

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAITRISE EN GÉNIE INDUSTRIEL
(CONCENTRATION EN PRODUCTIQUE)**

**PAR
AMINE OUERTANI**

**EFFETS DES STRATÉGIES DE MAINTENANCE SUR LA
PERFORMANCE D'UNE LIGNE DE PRODUCTION AVEC
ZONES DE STOCKAGE À CAPACITÉ FINIE**

NOVEMBRE 2010

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

RÉSUMÉ

C'est un contexte difficile où les clients exigent la réduction des prix et où la concurrence impose une compétition accrue. L'amélioration de la productivité au sein de l'entreprise est rendue de plus en plus nécessaire pour maintenir la compétitivité.

Vu ainsi, l'entreprise n'a donc plus le choix. Elle devra chercher des démarches efficaces pour aboutir à cet objectif, comme entre autres : réduire le dysfonctionnement interne des stations de travail ; en appliquant des bonnes stratégies de maintenance, diminuer le gaspillage et améliorer la qualité du produit /service. Cette étude se propose de modéliser une ligne de production formée par un nombre fini de stations de travail séparées par des zones de stockage à capacités finies, dans le but de voir l'effet de certains facteurs expérimentaux sur la performance de la ligne surtout du côté production. Pour ce faire, un total de 9 réseaux de simulation est construit via **ARENA**. Un plan factoriel complet, soit à 5 facteurs expérimentaux dont chacun présente 3 niveaux, a été élaboré afin de parcourir tous les scénarios possibles à simuler. Une analyse statistique via **MINITAB** a permis d'obtenir des résultats pertinents. Il en ressort que les facteurs expérimentaux tels que le nombre de machines travaillant en séries, la capacité du stock tampon, la variabilité du temps d'opération et le type de stratégies de maintenances à appliquer influencent de manière significative la performance de la ligne de production.

En effet, les stratégies de maintenance de type Bloc sont plus performantes que les stratégies de type âge sur la quantité produite. En outre, la présence des zones de stockages réduit la propagation des pannes le long de la ligne de fabrication et améliore la capacité de production. En plus, la réduction du coefficient de variabilité C_v améliore la performance des machines et par la suite l'efficacité de toute la ligne de production.

Par contre, le facteur lié à la distribution des défaillances n'avait pas une influence significative sur la performance de la ligne, vu que les modèles de simulations ont été optimisés via **OPTQUEST**.

Les résultats retenus serviront certainement d'outils pour les acteurs de l'amélioration des conditions de production.

REMERCIEMENTS

J'aimerais exprimer mes sincères remerciements ainsi que ma profonde reconnaissance pour la direction, l'aide et l'assistance que j'ai reçues des professeurs Georges Abdul-Nour et Serge Lambert tout au long de ce travail. Je tiens à vivement remercier Hélène Millette pour sa disponibilité et son aide dans mes simulations et la conception de mes modèles.

J'aimerais remercier l'école d'ingénierie et l'UQTR pour l'opportunité qu'ils m'ont offerte pour compléter ce mémoire de recherche.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
LISTES DES TABLEAUX.....	v
LISTES DES FIGURES.....	vi
LISTES DES ANNEXES.....	viii
LISTES DES ACRONYMES.....	ix
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GLOBALE.....	I
1.1. INTRODUCTION	1
1.2. PROBLÉMATIQUE.....	1
1.3. OBJECTIFS	2
CHAPITRE 2: LA MAINTENANCE ET LA FIABILITÉ.....	3
2.1. INTRODUCTION	3
2.2.1. Définition de la maintenance	3
2.2.2. L'importance de la maintenance.....	4
2.3. LES TYPES DE PANNES	4
2.3.1. LES PANNES INFANTILES	4
2.3.2. LES PANNES ACCIDENTELLES.....	5
2.3.3. LES PANNES DE VIEILLISSEMENT.....	5
2.4. LES TYPES DE MAINTENANCE.....	6
2.4.1. LA MAINTENANCE PALLIATIVE.....	6
2.4.2. LA MAINTENANCE PRÉVENTIVE.....	7
2.4.3. LA MAINTENANCE CORRECTIVE	7
2.4.4. LA MAINTENANCE SYSTÉMATIQUE	8
2.4.5. LA MAINTENANCE PRÉVISIONNELLE.....	8
2.4.6. LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE.....	9
2.5. LES MODÈLES DE MAINTENANCE.....	9
2.5.1. Analyse des coûts de maintenance.....	9
2.6. OPTIMISATION DES COÛTS DE DÉFAILLANCE C_d	11
2.7. LA MAINTENANCE CENTRALISÉE PAR RAPPORT À LA MAINTENANCE DÉCENTRALISÉE	12

2.8. RAPPEL DES NOTIONS DE BASE EN FIABILITÉ.....	14
2.8.1. DÉFINITION DE LA VARIABLE ALÉATOIRE ET DES LOIS DE DISTRIBUTIONS ASSOCIÉES	14
2.8.2. SYSTÈME NON RÉPARABLE	17
2.8.3. SYSTÈMES RÉPARABLES	20
2.8.4. LOI DE COMPOSITION DE LA FIABILITÉ : ASSOCIATION DES COMPOSÉS	22
CHAPITRE 3: LES STRATÉGIES DE MAINTENANCE.....	26
3.1. INTRODUCTION	25
3.2. LES STRATÉGIES MONO COMPOSANT.....	25
3.2.1. LES POLITIQUES DE REMPLACEMENT	25
3.3. LES STRATÉGIES MULTI-COMPOSANTS.....	36
3.3.1. LES CRITÈRES DE CLASSIFICATION DES STRATÉGIES DE MAINTENANCE MULTI COMPOSANTS	37
3.4. TABLEAUX RÉCAPITULATIFS.....	40
CHAPITRE 4: MODÉLISATION.....	54
4.1. INTRODUCTION	54
4.2. LA MODÉLISATION	55
4.2.2. LE SYSTÈME RÉEL	56
4.2.2. MODÈLE DE SIMULATION	58
4.2.3. LES HYPOTHÈSES.....	64
4.2.4. LE DIAGRAMME DE PROCESSUS DU MODÈLE DE SIMULATION	65
4.2.5. LE RÉSEAU D'ARENA-SIMAN	67
4.2.6. LA VALIDATION DU MODÈLE DE SIMULATION	81
4.3. LE MODÈLE MINITAB POUR LE TRAITEMENT DES RÉSULTATS.....	83
4.3.1. LE DESIGN EXPÉRIMENTAL	83
CHAPITRE 5: DESCRIPTION ET ANALYSE DES RÉSULTATS	86
5.2. RÉSULTATS VIA MINITAB.....	86
5.2.1. ANALYSE DE VARIANCE : ANOVA	86
5.3. LES EFFETS DES FACTEURS EXPÉRIMENTAUX SUR LE NOMBRE DE COMMANDES COMPLÉTÉES	89
5.3.5. LES EFFETS DES INTERACTIONS DOUBLES SUR LE NOMBRE DE COMMANDES COMPLÉTÉES	93
5.4. SOMMAIRE COMPARATIF AVEC D'AUTRES LECTURES PERTINENTES...	97
CONCLUSION ET RECOMMANDATION.....	99
RÉFÉRENCE.....	101

LISTE DES TABLEAUX

	PAGE
Tableaux	
Tableau1 : Les avantages et les inconvénients de la maintenance centralisée.....	9
Tableau2 : Les avantages et les inconvénients de la maintenance décentralisée.....	10
Tableau3 : Les exemples classiques de lois discrètes et continues.....	16
Tableau4 : Récapitulation des littératures visant les stratégies de maintenance mono composant.....	48
Tabeleau5: Revue de la littérature sur les stratégies de maintenance multi composants.....	56
Tableau6 : Facteurs expérimentaux et leurs niveaux	62
Tableau7 : Les différents paramètres d'optquest (réponse, contrainte et contrôle).....	80
Tableau8 : Les valeurs optimales associées à chaque stratégie de maintenance	80
Tableau9 : Expérience pilote	82
Tableau10: Plan factoriel complet et résultats de simulation	104
Tableau11: ANOVA (1) sur le nombre des unités produites « q ».....	87
Tableau12: ANOVA (2) sur le nombre des unités produites « q ».....	88

LISTE DES FIGURES

Figures	PAGE
Figure1 : La courbe baignoire.....	3
Figure2 : Niveau optimum d'intervention préventive.....	12
Figure3 : Les états successifs d'un système réparable.....	21
Figure4 : Système série.....	22
Figure5 : Système parallèle.....	23
Figure6 : Redondance m parmi n.....	23
Figure7 : Redondance Passive.....	24
Figure8 : Relation entre X_n , T_n et $N(t)$	27
Figure9 : Les variables γ_i , δ_i et β_i	29
Figure10: Transition entre deux situations.....	30
Figure11: Les taux de naissance et de mort.....	31
Figure12: Séquence d'événement pour la stratégie de maintenance de type âge.....	34
Figure13: Séquence d'événement pour la stratégie de maintenance de types bloc (BRP).....	36
Figure14: Séquence d'événement pour la stratégie de maintenance de types bloc (BRP) avec réparation minimale.....	38
Figure15: Séquence d'événement de la stratégie de type bloc utilisant de l'équipement neuf et usagé (EBRP).....	43
Figure16: Le déroulement des processus coût et temps limites de réparation.....	45
Figure17: Déroulement de la maintenance préventive séquentielle.....	47
Figure18: Étapes d'une étude de simulation.....	54
Figure19: La définition de la modélisation.....	55
Figure20: Diagramme i : pour la phase de production de 2 machines en séries avec stock tampon.....	66
Figure21: Diagramme ii : la logique du modèle de simulation de la stratégie de type âge..	67
Figure22: Réseau de production.....	87

Figure23: Réseau pour la phase de la maintenance.....	88
Figure24:Réseau d'une ligne de production composée par 2 machines avec un stock tampon et en appliquant la stratégie arp.....	89
Figure25:La structure du plan factoriel complet.....	83
Figure26:Variation de la quantité "q" en fonction du "m".....	90
Figure27:Variation de la quantité "q" en fonction de "i"	91
Figure28:Variation de la quantité produite" en fonction du cv.....	92
Figure29:Effet des stratégies (arp; brp et mbrp) sur la capacité de production	93
Figure30:Effet des interactions "s*m" sur la performance de la ligne	94
Figure31:Effet des interactions p*i sur la performance de la ligne	95
Figure32:Effet des interactions m*p sur la performance de la ligne	96

LISTE DES ANNEXES

Annexes	Page
Annexe I : Résultats de simulation.....	109
Annexe II : Rapport MINITAB	126
Annexe III : Optimisation et Validation des réseaux	160
Annexe V : Réseaux de tous les modèles de simulations (CD).....	Fin

LISTE DES ACRONYMES

ABAO	: As Bad As Old
AGAN	: As Gold As New
RM	: Réparation Minimale
MP	: Maintenance Préventive
ARP	: Remplacement de type âge
BRP	: Remplacement de type bloc
MBRP	: Remplacement modifié de type bloc
SBRP	: Remplacement standard de type âge
CT	: Temps Continu
DT	: Temps Discret
ST	: Stock Tampon
T	: Temps de remplacement
T_c	: Temps de remplacement Correctif
S	: Seuil de remplacement
T_{rm}	: Temps de réparation minimal
T_p	: Temps de remplacement préventif
C V	: Coefficient de Variation

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GLOBALE

1.1. INTRODUCTION

Les enjeux socio-économiques croissants, liés aux impératifs de sécurité, aux exigences de protection de l'environnement et aux gains de productivité sur des systèmes de plus en plus complexes, placent les problèmes de maintenance au centre des préoccupations sur l'optimisation des processus industriels. Ainsi, les stratégies de maintenance sous ses nouvelles formes de type prévisionnel, opportuniste et correctif sont à considérer comme un levier d'action sur la performance globale en entreprise dans les logiques de développement durable. Donc pour réussir, de nos jours, l'entreprise n'a plus le choix, elle doit revoir sa façon de faire les choses. L'optimisation des politiques de la maintenance, appliquées sur les systèmes complexes ou multi composants, par des méthodes analytiques ou des modèles de simulation est un moyen dont dispose l'entreprise pour assurer la continuité de son succès, en améliorant d'une part la productivité et d'autre part la qualité.

En fait, les modèles analytiques traduisent l'objectif visé et les contraintes permettent, entre autres, d'établir les conditions d'existence et d'unicité d'une politique de maintenance optimale et d'effectuer des analyses de sensibilités. Toutefois, on tombe dans des cas où la modélisation analytique se révèle, a priori, complexe à cause de la prise en compte de tous les facteurs ayant un impact significatif sur la performance du système. Ce constat nous amène à explorer le potentiel de la simulation pour évaluer la performance de systèmes assujettis à divers facteurs contrôlables, tout particulièrement les politiques de maintenance.

1.2. PROBLÉMATIQUE

Cette recherche propose d'explorer le potentiel d'une approche combinant les techniques de simulation et d'optimisation dont l'objectif est d'évaluer la performance des systèmes industriels, à savoir une ligne formée par un nombre fini de stations séparées par des stocks tampons à capacités finies, assujettis à différents facteurs expérimentaux qui seront fixés

par la suite, comme par exemple : les politiques de maintenance. Pour ce faire, l'outil de simulation **ARENA** est choisi à l'occasion, puisqu'il offre une grande souplesse de modélisation et permet de suivre l'évolution de chaque ressource tout en apportant plus de performance au système simulé.

1.3. OBJECTIFS

Cette étude a pour objectifs :

- * La conception d'un modèle de simulation via **ARENA**, reflétant le comportement le plus fidèle possible au système réel, se manifestant dans une ligne de production composée d'un nombre fini de machines séparées par des stocks tampons à capacités finies,
- * La réalisation d'une étude statistique via **MINITAB** dans le but d'évaluer la performance du système de production. Pour ce faire, un plan d'expérience est construit, permettant de parcourir les diverses combinaisons possibles entre les différents facteurs expérimentaux. Par la suite, les résultats de simulation relatifs à chaque scénario sont déterminés et une analyse statistique est réalisée pour déterminer les facteurs et les interactions dont les effets sont significatifs sur la performance du système de production.

CHAPITRE 2

LA MAINTENANCE ET LA FIABILITÉ

2.1. INTRODUCTION

Au cours de ce chapitre, dans une première partie, la maintenance est définie de manière générale. Dans les parties subséquentes, un rappel est introduit sur les notions de bases en probabilité, les concepts de bases relatifs au calcul de la fiabilité des systèmes industriels, les processus stochastiques et la théorie de renouvellement. Ce chapitre sert d'introduction aux problématiques traitées dans le reste de ce mémoire.

2.2. LA MAINTENANCE

2.2.1. Définition de la maintenance

La maintenance est l'ensemble des moyens nécessaires pour maintenir et remettre les facteurs d'opérations en bon état de fonctionnement. (Benedetti, C. (2002)). Elle comprend l'ensemble des moyens d'entretien et leur mise en œuvre. La différence entre la maintenance et l'entretien est que ce dernier consiste à maintenir les facteurs d'opérations en état de fonctionnement adéquat. En fait, les facteurs d'opérations se manifestent dans les moyens et les ressources indispensables à la création du bien ou du service, comme entre autres: les machines, les équipements, etc.

Selon AFNOR X 60-010, la maintenance est « l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à réaliser un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise (Monchy, F. (2003)). Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management ».

D'après la définition CEN projet WI 319-003 (1997), la maintenance est « l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de gestion durant le cycle de vie d'un bien , destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise » . (Monchy, F. (2003)). La fonction requise est ainsi définie : « fonction,

ou ensemble de fonctions d'un bien considérées comme nécessaires pour fournir un service donné ».

Le problème qui réside est que la plupart des entreprises ne sont pas sensibilisées à l'importance de la maintenance au sein de l'industrie.

2.2.2. L'importance de la maintenance

La maintenance est importante pour l'industrie, ce qui paraît clair lors de l'occurrence des pannes provoquant des arrêts non planifiés. (Benedetti, C. (2002)). Par conséquent, toute interruption au cours du fonctionnement cause, comme entre autres:

- Augmentation du coût de productions,
- Diminution de la marge du profit,
- Rupture du stock,
- Retard des livraisons,
- Ajout des heures supplémentaires,
- Absence des sécurités des opérateurs.

Donc, si on planifie et on prévoit des entretiens planifiés avant l'occurrence des pannes, on pourra surmonter ces conséquences.

Pour ce faire, la partie suivante comprend l'analyse des types de pannes et des stratégies adéquates pour les maintenir.

2.3. LES TYPES DE PANNES

Pour expliquer les différents types de pannes, une courbe baignoire présentée par la figure 1 est utilisée. Cette courbe présente l'évolution du taux de défaillance au cours du temps et elle se divise en trois zones : zone A : Période de jeunesse; zone B : Période utile et zone C : Période d'usure. Elle représente seulement 4% des défaillances observées dans la réalité et elle est beaucoup utilisée dans l'étude théorique.

2.3.1. Les pannes infantiles

On entend par ces pannes, celles qui surviennent au début de la mise en œuvre de l'équipement. Par exemple, au début de l'utilisation de nouvelles machines, la friction des pièces neuves peut causer la surchauffe des éléments, d'où une possibilité de panne. En

outre, ce type de pannes peut être la cause d'une mauvaise manipulation due au manque d'information sur la machine. (Benedetti, C. (2002)). Ces pannes infantiles s'appellent des pannes de jeunesse, lesquelles apparaissent au début de la vie des équipements ou dans leurs périodes de rodage ou en cas de la remise à neuf d'un équipement. Cette période est présentée par la zone A dans la figure 1.

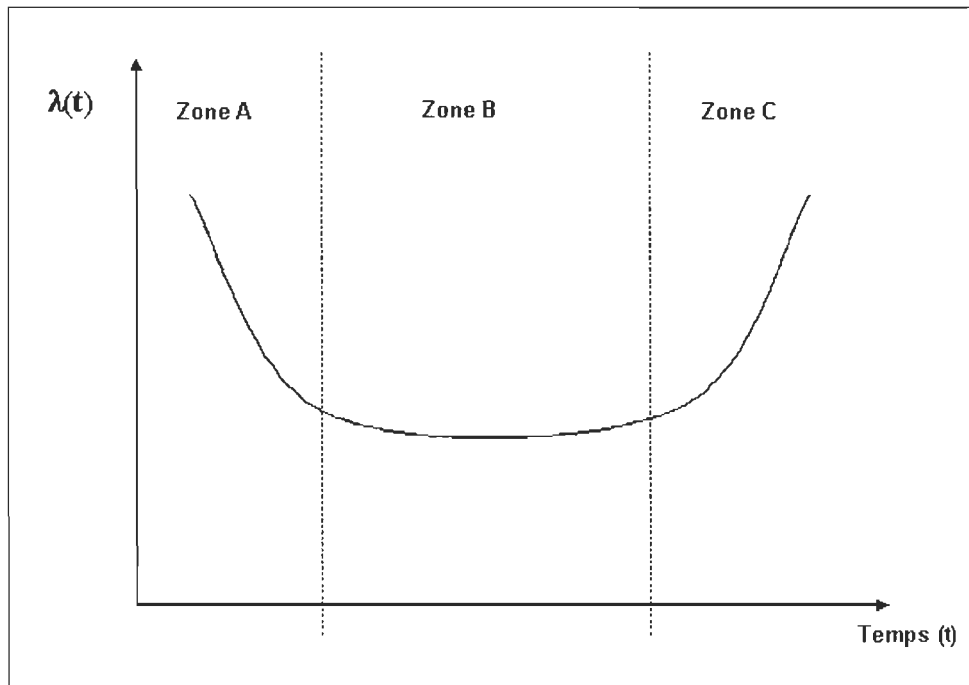


Figure 1 : La courbe baignoire

2.3.2. Les pannes accidentelles

En fait, ce sont des pannes qui surviennent de manière imprévisible et totalement aléatoire dans la période de la vie utile de la machine. (Benedetti, C. (2002)). Elles entraînent des arrêts non planifiés très onéreux contrairement aux pannes infantiles. Cette phase est indiquée par la zone B dans la figure 1.

2.3.3. Les pannes de vieillissement

Après une certaine période de fonctionnements plus ou moins longs, le système vieillit, s'use et la probabilité qu'il tombe en panne augmente considérablement. (Benedetti, C.

(2002)). On parle ici de la période de vieillissement du système présentée par la zone C dans la figure 1.

Pour faire face à ces pannes, des stratégies de maintenances sont très recommandées selon les zones d'occurrences des défaillances.

2.4. LES TYPES DE MAINTENANCE

Parmi les stratégies de maintenances, on distingue, comme entre autres:

- La maintenance palliative,
- La maintenance préventive,
- La maintenance corrective.
- La maintenance systématique.
- La maintenance prévisionnelle.
- La maintenance conditionnelle.

2.4.1. La maintenance palliative

Cette politique, appelée aussi curative ou de catastrophe, a pour tâche de remettre en état de fonctionnement l'équipement arrêté ou ne fonctionnant pas correctement à la suite d'une panne. Son coût est très élevé, pour plusieurs raisons :

- Non respect des dates de livraisons, d'où le risque de perdre des clients qui vont chercher des concurrents,
- Recours aux heures supplémentaires qui coûtent chers,
- Baisse de la qualité des produits,
- Absence de la sécurité dans les lieux de travail,

Pour remédier à ces pannes, on a recours :

- Aux équipements de secours ou en attente qui peuvent entrer directement en fonction à la place de l'équipement défectueux,
- Besoin d'une équipe d'entretien hautement qualifiée et compétente.

Le plus souvent, ces solutions sont un peu coûteuses. (Benedetti, C. (2002)). D'où l'intérêt de faire une étude de rentabilité pour savoir s'il est préférable de subir les inconvénients des pannes plutôt que de subir les coûts qu'entraîneraient ces solutions.

2.4.2. La maintenance préventive

Cette politique comporte les activités relatives à l'entretien périodique et nécessaire au fonctionnement de l'équipement et des installations, telles que : (Benedetti, C. (2002)).

- Le nettoyage,
- La vidange de l'huile, le graissage,
- Les remplacements à intervalle régulier,
- L'inspection périodique de l'équipement et de l'installation de l'entreprise,

En fait, ce qui caractérise cette stratégie est son intervalle fixe d'application, ce dernier est déterminé par :

- L'expérience de l'utilisation,
- Les recommandations du fabricant,
- Le taux d'utilisation.

La maintenance préventive est appliquée hors des heures de travaux, dans les vacances et les périodes non chargées. En effet, elle apporte beaucoup d'avantages, comme entre autres:

- Augmenter la durée de vie,
- Création d'un environnement sain et sécurisé,
- Augmenter la qualité des produits et de vie du travail,
- Éviter des arrêts coûteux.

Selon CEN WI 319-003, la maintenance préventive est définie ainsi : « maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité des défaillances ou la dégradation du fonctionnement d'un bien ».

2.4.3. La maintenance corrective

Cette tâche consiste à l'amélioration de l'équipement et des installations, en vue de rendre les pannes moins fréquentes et les coûts de maintenances moins élevés. La majorité des travaux de maintenance se font durant les remises à neuf d'un équipement qui présente une révision complète de tous ses éléments, exécutée après une période définie d'utilisation. C'est une tâche qui s'étend sur une longue période. (Benedetti, C. (2002)).

Dans le projet de norme CEN WI 319-003, la maintenance corrective est définie ainsi : « maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ».

« Elle peut être différée si elle n'est pas exécutée immédiatement après la détection d'une panne, mais est retardée en accord avec des règles de maintenance données ». (Monchy, F. (2003)). Elle peut être « d'urgence » si « elle est exécutée sans délai après détection d'une panne afin d'éviter des conséquences inacceptables ».

2.4.4. La maintenance systématique

La maintenance systématique est l'ensemble des activités déclenchées suivant un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage » et aussi « les remplacements des pièces et des fluides ont lieu quel que soit leur état de dégradation, et ce de façon périodique ». Norme AFNOR X 60-010. (Monchy, F. (2003)).

Selon le projet de norme CEN WI 319-003, est une maintenance programmée : « Maintenance préventive exécutée selon un calendrier préétabli ou selon un nombre définie d'unités d'usage ». Aussi, « Maintenance préventive exécutée sans contrôle préalable de l'état du bien et à des intervalles définis ». (Monchy, F. (2003)).

2.4.5. La maintenance prévisionnelle

La maintenance prévisionnelle est: « une maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien permettant de retarder et de planifier les interventions. Elle est parfois improprement appelée maintenance prédictive ». (AFNOR X60-010). (Monchy, F. (2003)).

Selon le projet de norme CEN WI 319-003, la maintenance prévisionnelle : « est une maintenance préventive exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation des paramètres significatifs de la dégradation du bien. (Monchy, F. (2003)).

2.4.6. La maintenance conditionnelle

La maintenance conditionnelle : « est une maintenance préventive consistant en une surveillance du fonctionnement du bien et des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent ». (Monchy, F. (2003)).

On remarque bien que ces dernières stratégies sont considérées comme des sous-classes de la maintenance préventive.

2.5. LES MODÈLES DE MAINTENANCE

Les modèles de maintenances se manifestent essentiellement dans :

- Le modèle de maintenance minimale,
- Le modèle de maintenance parfaite,
- Le modèle de maintenance imparfaite.

Ces modèles de maintenance seront élaborés ultérieurement.

2.5.1. Analyse des coûts de maintenances

Dans cette section, en se référant à (Monchy, F. (2003)), on analyse les coûts de maintenance pour le cas : corrective et préventive.

a) Coûts de la maintenance corrective

Pour les coûts de maintenance corrective, nous adopterons le modèle suivant :

$$C_d = C_m + C_i \quad (1)$$

Avec :

C_d est le coût de défaillance, résultant des coûts directs et indirects d'une ou d'un cumul de défaillance relative à un équipement.

C_m est le coût direct de maintenance de caractérisation simplifiée (pièce, main d'œuvre, la non qualité, la perte de production, etc.).

C_i est le coût d'indisponibilité caractérisant le coût cumulé de toutes les conséquences indirectes induites par l'indisponibilité propre de l'équipement.

*** Constitutions des coûts directs de maintenance C_m**

- Coût de la main-d'œuvre,
- Frais généraux du service de maintenance : Ils comportent les appointements des cadres, des employés de bureau, les loyers et assurances, les frais de chauffage, d'éclairage, de communication, etc.
- Coût de possession des stocks, des outillages et des machines.
- Coût de consommation de matières, produits et fournitures utilisés.
- Coût de consommation des pièces de rechange
- Coût des contrats de maintenance
- Coût des travaux sous-traités

Donc, il est possible de regrouper les coûts directs de maintenance sous quatre rubriques :

- C_{mo} dépense de main-d'œuvre,
- C_f dépense fixe du service maintenance,
- C_c dépense de consommable,
- C_e dépense externalisée.

D'où, C_m peut s'écrire sous la forme suivante :

$$C_m = C_{mo} + C_c + C_f + C_e \quad (2)$$

*** Constituants des coûts d'indisponibilité C_i**

Ils intègrent toutes les conséquences économiques induites par un arrêt propre d'un équipement requis. Ils sont parfois nommés coût de perte de production ou coût de non maintenance. Le problème, à ce niveau, est que les coûts indirects sont difficilement quantifiables ou ne le sont pas du tout. Les conséquences d'une défaillance fortuite sur un équipement requis peuvent porter sur les éléments suivants :

- La perte de production C_p , tel que :

$$C_p = \tau_2 \cdot T_i \quad (3)$$

Avec T_i est le temps de l'indisponibilité propre relevé pendant une période où l'équipement défaillant est requis.

τ_2 est le taux horaire, exprimé en dollar/heure, déterminé pour l'équipement considéré. Il dépend majoritairement de la criticité de l'équipement à l'intérieur de l'ensemble du système de production. Lorsque le taux τ_2 intègre tous les critères de perte suivants, la formule devient :

$$C_i = \tau_2^* . T_i \quad (4)$$

- Le coût de main d'œuvre de production inoccupée pendant T_i ,
- Le coût d'amortissement du matériel arrêté,
- Le coût des arrêts induits, l'arrêt d'une unité perturbe rapidement les unités amont (saturation) et aval (pénurie).
- Le coût dû aux frais de redémarrage de la production,
- Les coûts induits en cas d'accidents corporels,
- Les coûts induits par les délais non retenus. Pénalité de retard, perte de clients ou dégradation de l'image de marque de l'entreprise.

b) Coût de maintenance préventive

Les coûts de maintenance préventive C_{mp} varient logiquement à l'inverse des coûts directs de maintenance corrective C_{mc} . En fait, la stratégie de maintenance permet de choisir librement le niveau de soin préventif à organiser sur un équipement. Dans ce cas, les coûts correctifs deviennent des coûts résiduels.

2.6. OPTIMISATION DES COÛTS DE DÉFAILLANCES C_d

Comme le montre la figure suivante, C_i et C_m varient en sens inverse, dans la mesure où la réduction des temps d'indisponibilité est le résultat d'une maintenance préventive plus efficace.

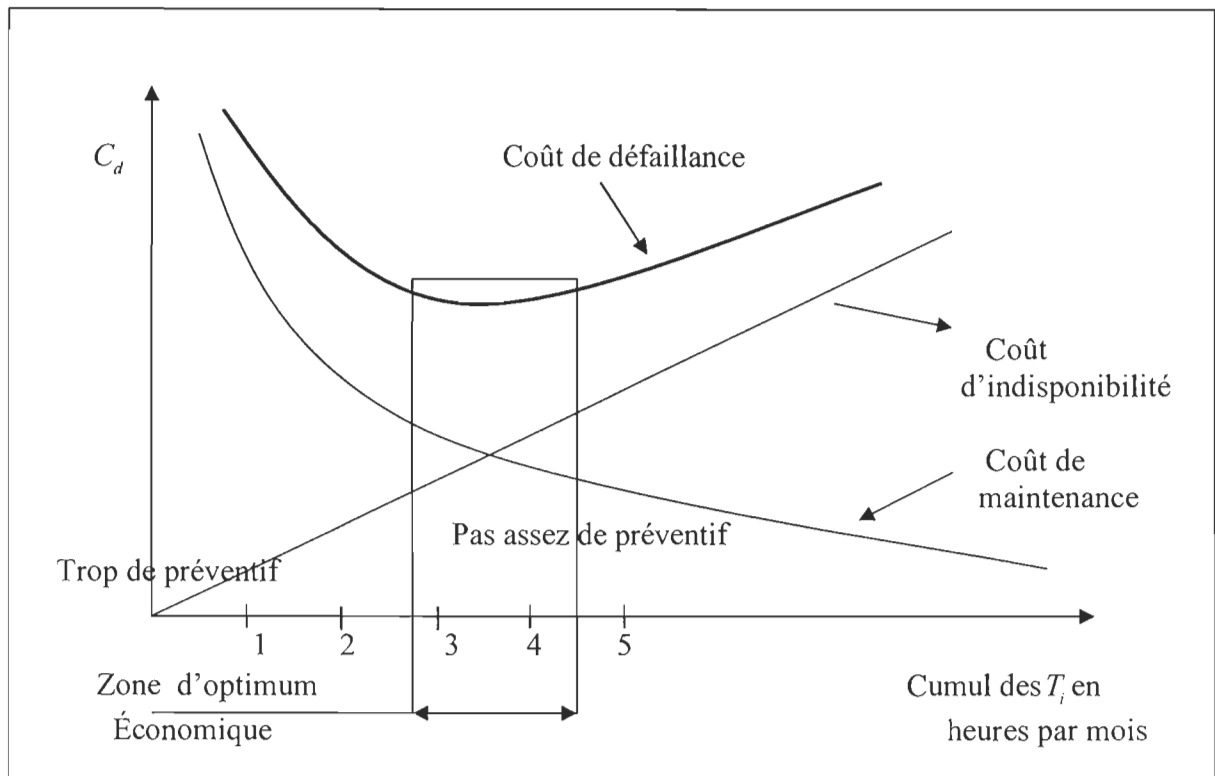


Figure 2 : Niveau optimum d'intervention préventive

La figure 2 met en évidence la proportionnalité $C_i = \tau.T_i$, les T_i étant relevés en heures d'indisponibilité par semaine ou par mois. Les coûts directs de maintenance sont dans ce cas préventifs, le graphe montrant l'existence d'une limite de disponibilité intrinsèque qui demande trop de coût directs pour être approchée.

2.7. LA MAINTENANCE CENTRALISÉE PAR RAPPORT À LA MAINTENANCE DÉCENTRALISÉE

Il existe deux visions concernant la structure d'un service de maintenance :

- La maintenance centralisée, indiquée dans le tableau 1,
- La maintenance décentralisée.

Tableau 1 : Les avantages et les inconvénients de la maintenance centralisée

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Responsabilité des travaux de maintenance confiée à une seule personne, ➤ Bonne formation des équipes, ➤ Meilleure utilisation des compétences, ➤ Exécution rapide des travaux d'urgence. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Surveillance difficile de maintenance à cause de l'éparpillement des employés aux quatre coins, ➤ Diversité de la formation des personnes travaillant en maintenance, ➤ Insensibilité aux problèmes touchants les services de productions,

Quelques entreprises optent pour la décentralisation de la maintenance. Pour sa part, le tableau 2 examine les avantages et les désavantages d'une maintenance décentralisée. (Benedetti, C. (2002)).

Tableau 2 : Les avantages et les inconvénients de la maintenance décentralisée

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Plus de sensibilité aux problèmes de production, ➤ Meilleure surveillance du travail, ➤ Meilleure connaissance de l'équipement, 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mauvaise planification des travaux de maintenance, ➤ Difficulté de cerner la maintenance, car elle est partagée entre plusieurs personnes, ➤ Difficultés de contrôler les coûts,

Pour conclure, la maintenance centralisée est destinée aux petites entreprises, ou aux grandes usines fabriquant un seul produit (Benedetti, C. (2002)). Quant à la maintenance décentralisée, elle se dirige vers les grandes entreprises fabriquant des produits divers.

Par ailleurs, les notions de base en fiabilité, les processus stochastiques et en particulier le processus de renouvellement seront présentées.

2.8. RAPPEL DES NOTIONS DE BASE EN FIABILITÉ

2.8.1. Définition de la variable aléatoire et des lois de distributions associées

Une variable aléatoire est une fonction X définie comme suit :

$$V.a : \omega \rightarrow X(\omega) \in R,$$

À partir de cette définition, on peut définir la loi de probabilité où la distribution est associée à cette variable aléatoire qui présente l'ensemble des valeurs $P_X(A)$ pour tous les événements A . (Nedzela, M. (1987)).

Il y a deux types de loi d'une variable aléatoire :

- La loi discrète : Où la variable aléatoire X prend ses valeurs dans un ensemble dénombrable (x_1, x_2, \dots) et sa distribution est précisée par les nombres $P(X(\omega) = x_i)$.

$$P(X(\omega) \in A) = \sum_{x_i \in A} P(X(\omega) = x_i) \quad (5)$$

- La loi continue : la variable aléatoire prend des valeurs qui varient de manière continue sur un sous ensemble et sa distribution est précisée par une fonction non négative $f(x)$ appelée fonction de densité :

$$P(X(\omega) \in A) = \int_A f(x) dx \quad (6)$$

Ceci nous amène à la fonction de répartition $F(x)$ qui est définie par :

$$F(x) = P(X \leq x); -\infty \leq x \leq \infty \quad (7)$$

Le tableau 3 résume les différentes lois de distributions suivies par une variable aléatoire.

Tableau 3 : Les exemples classiques de lois discrètes et continues

Catégories	Nom	Descriptions
Discrète	Loi de Bernoulli	La loi de Bernoulli correspond à un lancer de pile ou face : $p = \text{succès}$; $q = (1-p) = \text{échec}$. <ul style="list-style-type: none"> • $P(X = 1) = p$ • $P(X = 0) = q$
	Loi binômiale	n épreuves de Bernoulli identiques. $p[X = k] = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$ pour tout k de 0 à n , p étant un réel compris entre 0 et 1
	Loi de Poisson	$p[X = k] = \frac{\lambda^k}{k!} \exp(-\lambda)$ avec k un entier et $\lambda > 0$
	Loi Géométrique	$P(X = n) = (1-p)^{n-1} p$ où p est un réel compris entre 0 et 1 et n un entier non nul.
Continue	Loi Uniforme	Loi uniforme continue sur un intervalle borné $[a; b]$: $f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{si } x \in [a, b] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

	Loi Normale	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ <p>Avec : σ est l'écart type de la distribution. μ est la moyenne de la distribution.</p>
	Loi Exponentielle	$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$ <p>Avec $\lambda > 0$.</p>
	Loi Weibull	$f(x, k, \lambda) = \left(\frac{k}{\lambda}\right) \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}$ <p>Avec $\lambda > 0; k, x > 0$</p>
	Loi Gamma	$f(x, k, \theta) = \frac{x^{k-1} \cdot e^{-\frac{x}{\theta}}}{\Gamma(x)\theta^k}$ <p>$k, \theta > 0$ et $x > 0$</p>

Pour ce cas, on s'intéresse au comportement aléatoire de la maintenance des systèmes industriels se manifestant dans les instants d'occurrence des pannes qui se produisent de manière imprévisible et dans la cadence de production des diverses machines.

Comme cela a été déjà mentionné dans la partie problématique, l'étude portera sur une ligne de production avec des stocks intermédiaires à capacités finies. Pour mieux comprendre les divers termes liés aux systèmes productifs et en particulier la ligne de production, une présentation globale de ces différentes caractéristiques sera effectuée.

Pour commencer, un système de production se caractérise par sa :

- **Flexibilité** : Il existe plusieurs types, citons : flexibilité de produits, de mélange, de quantité, de routage, d'ordre des opérations, d'expansion et des ressources, (Draghici, G et al. 1998).
- **Réactivité** : c'est l'aptitude à répondre dans un temps requis aux changements de son environnement interne ou externe par rapport au régime permanent (Draghici, G et al. 1998). La réactivité nécessite une vision dynamique de tout l'entourage, et afin d'assurer cette propriété, trois fonctions s'avèrent nécessaires : (Fonction d'observation, Fonction de surveillance et Fonction de correction)

- **Proactivité** : Amélioration des connaissances et assurance des nouveaux apprentissages. (Draghici, G et al. 1998)

Dans l'ensemble des systèmes industriels, il existe deux familles :

- Système non réparable,
- Système réparable.

2.8.2. Système non réparable

Un système non réparable est : tout système pour lequel les tâches de réparations sont techniquement impossibles au cours de sa mission. Dans certaines conditions, la réparation est techniquement réalisable, mais, économiquement parlant, elle est difficilement justifiable. (Ait-Kadi, D. (2003)). La fiabilité est souvent la grandeur la plus utilisée pour mesurer la performance de ce genre de système par rapport à leurs âges.

Pour cette famille de systèmes, les grandeurs suivantes sont importantes, à savoir:

- Durée de vie,
- Fiabilité,
- Défaillance,
- Taux de panne,
- Temps moyen de bon fonctionnement.

a) Durée de vie

La durée de vie est une grandeur qui quantifie le service assuré par un système. (Ait-Kadi, D. (2003)). Le terme est un terme générique. Il peut référer à plusieurs unités de mesures, comme entre autres:

- **Le temps** (heures, jours, mois, cycle) : Citons l'exemple d'un transformateur électrique ou celui des pneus d'un camion.
- **Énergie consommée** (carburant) : Dans le cas de certains équipements dont l'effort, et par conséquent l'usure, ceux-ci sont linéairement proportionnels à l'énergie consommée ou produite.

- **Distance parcourue** : la durée de vie d'une voiture est généralement linéairement corrélée avec la distance parcourue. L'utilisation de la distance parcourue comme mesure de la durée de vie est justifiée si les conditions d'utilisation tout au long de l'âge du système restent uniformes.

Sans perte de généralité, tout au long de ce mémoire, la durée de vie est représentée par le temps.

b) La fiabilité

La fiabilité $R(t)$ d'une entité exprime son aptitude à accomplir une fonction requise dans des conditions données et pendant un intervalle de temps donné. (Lewis, E.E. A. (1994)). Elle tient compte de l'environnement et des conditions d'opération. La fiabilité caractérise la continuité d'une activité sans interruption forcée. Il s'agit d'une notion probabiliste qui se calcule sur la base de l'historique des durées de vie enregistrées.

Si $f(t)$ désigne la fonction de densité des durées de vie d'un système avec $\int_0^t f(u)du$ est la fonction de répartition $F(t)$ qui représente la probabilité de défaillance à un temps u antérieur à t . La fiabilité $R(t)$ de ce système à un instant t est définie comme la probabilité de non défaillance, donc c'est l'événement complémentaire du précédent :

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(u)du \quad (8)$$

En dérivant, on obtient :

$$\frac{dR(t)}{dt} = -f(t)$$

Avec : $R(0) = 1$ et $R(\infty) = 0$

$R(t)$ est donc une fonction monotone décroissante.

En étudiant la fiabilité d'un système, les caractéristiques suivantes sont également à étudier :

- Sa durée de vie et sa durée moyenne de vie,

- Le nombre de pannes dans $[0, t]$,
- Le temps moyen entre les pannes successives,
- Le temps total de fonctionnement dans $[0, t]$,
- La durée de réparation.

c) Défaillance

Une défaillance est l'événement qui annonce la cessation d'une activité d'un système. Les défaillances sont généralement réparties en deux catégories :

- Celles qui sont en fonction de l'utilisation du système. On parle, dans ce cas, des défaillances dépendantes de l'opération. (Ait-Kadi, D. (2003)).
- Pour certains équipements et dans certains environnements, l'usure peut avoir lieu sans même que l'équipement ne soit appelé à servir. On parle alors de défaillances dépendantes du temps. Ce type de défaillances est observable pour certains équipements de réserve (stand by). (Ait-Kadi, D. (2003)).

Pour chacun des types cités ci-dessus, deux sous-familles de défaillances sont identifiées :

1. **Les défaillances réparables** : dans ce cas, la mission du système est temporairement interrompue suite à la défaillance. (Ait-Kadi, D. (2003)). Des réparations mineures ou des réfections majeures permettent de rétablir la fonction du système.
2. **Les défaillances non réparables** : ces défaillances annoncent la fin de la vie du système. (Ait-Kadi, D. (2003)). La durée de vie du système est alors : la quantité mesurée entre l'instant de la mise en service de l'équipement et l'instant de la défaillance qui mène à la mise au rebut.

d) Taux de panne

- Taux instantané de défaillance

Ce taux, nommé aussi taux de défaillance ou taux de mortalité est la probabilité d'avoir une défaillance entre l'instant t et $t + dt$ sachant que le système a opéré sans défaillance jusqu'à l'instant t . (Lewis, E.E. A. (1994)). Il s'agit d'un taux instantané de défaillance de l'équipement et il s'écrit comme suit :

$$\lambda(t)dt = \frac{dR(t)}{R(t)} \quad (9)$$

e) Temps moyen de bon fonctionnement MTBF

C'est l'acronyme de la désignation anglaise (Mean Time Between Failure). C'est l'espérance mathématique de la durée de vie d'un système. (Monchy, F. (2003)). En d'autres termes, c'est le temps moyen entre deux défaillances. Si $f(t)$ désigne la loi de densité des durées de vie d'un système, le **MTBF** se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt = \int_0^{\infty} t \cdot f(t)dt \quad (10)$$

2.8.3. Systèmes réparables

Pour ce type de systèmes, l'occurrence d'un bris est généralement suivie d'une série d'activités d'entretien. À titre d'exemples, citons : le diagnostic, l'affectation des ressources pour effectuer les réparations, la commande des pièces de rechange, les tâches de réparation, les tests fonctionnels et la remise en service. (Ait-Kadi, D. (2003)). Dans certaines conditions, d'autres activités peuvent se rajouter comme les délais administratifs. Non seulement les défaillances qui nécessitent des efforts d'entretiens, mais aussi les activités de maintenance préventive et les réfections. Pour les systèmes réparables, on convient d'utiliser la disponibilité comme indicateur de performance par rapport au temps. Dans certaines configurations où les machines opèrent selon des structures parallèles, l'utilisation de la fiabilité pour mesurer la performance du système est aussi indiquée.

En fait, les grandeurs et les paramètres liés aux systèmes réparables sont :

a) Taux de réparation

C'est la grandeur qui mesure la vitesse de réalisation des activités d'entretien d'un système réparable. Cette grandeur sera notée : $\mu(t)$.

b) Temps de fiabilité, maintenabilité et disponibilité

Temps de fiabilité

La figure 3 schématise les états successifs que peut prendre un système réparable.

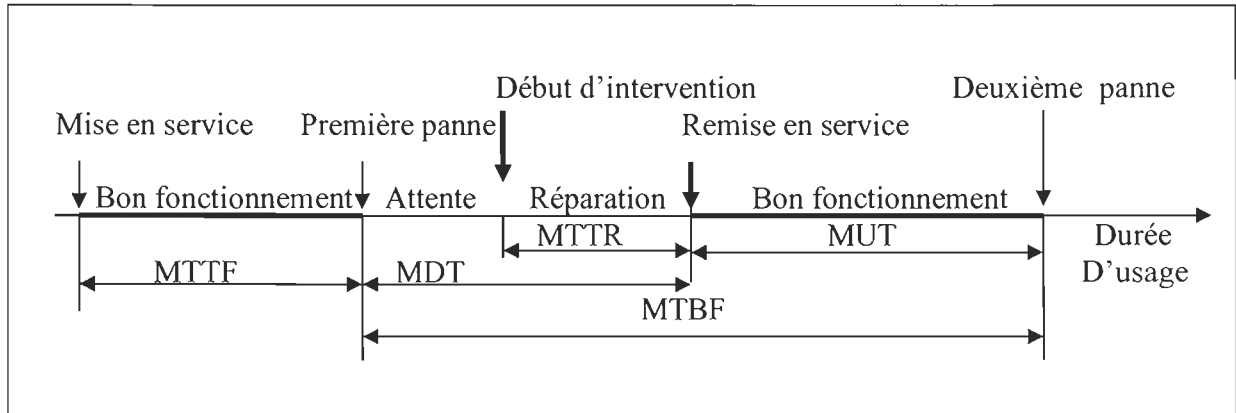


Figure 3 : Les états successifs d'un système réparable

* **MTTR** : C'est l'acronyme de la désignation anglaise (*Mean Time To Repair*). Le temps technique moyen de réparation est l'espérance mathématique des durées de réparation. (Monchy, F. (2003)). Si $f(t)$ désigne la loi de densité des temps techniques de réparation, le *MTTR* est défini par

$$MTTR = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (11)$$

Le **MTTR** est l'inverse du taux de réparation.

* **MTTF** : (*Mean Time To first Failure*) C'est le temps moyen avant la première défaillance,

* **MTBF** : (*Mean Time Between Failure*) C'est le temps moyen entre deux pannes,

* **MDT** : (*Mean Down Time*) C'est le temps moyen d'indisponibilité ou d'arrêt propre,

* **MUT** : (*Mean Up Time*) C'est le temps moyen de disponibilité,

Disponibilité

Le concept de la disponibilité concerne seulement les systèmes réparables. (Ait-Kadi, D. (2003)). On convient de désigner par système réparable tout système pouvant être remis en état d'opération soit après une défaillance accidentelle ou après une action préventive.

En fait, l'indicateur de base de la disponibilité opérationnelle est exprimé comme suit :

$$\frac{MTBF}{MTBF + MTTR} < 1 \quad (12)$$

La maintenabilité

Dans des conditions spécifiées d'utilisation, la maintenabilité désigne l'aptitude d'une entité à être maintenue ou remise en service, sur un intervalle donné de temps, dans un état dans lequel elle peut accomplir sa mission. (Ait-Kadi, D. (2003)). Ceci suppose que la maintenance est accomplie dans des conditions spécifiées avec des procédures et des moyens prescrits.

MTTR est l'indicateur de maintenabilité.

2.8.4. Loi de composition de la fiabilité : Association des composés

Soit R_i ; $i=1,2,3...n$, la fiabilité relative à chaque composant i .

a) Configuration en série

La configuration en série est une caractéristique de l'association d'équipements en ligne de production (Lewis, E.E. A. (1994)). Au niveau des sous-composants d'un système, le modèle en série présenté par la figure 4 est le plus fréquent et il représente le cas de cette étude. Il se caractérise par le fait « qu'il suffit qu'un composant soit défaillant pour que le système soit défaillant ».

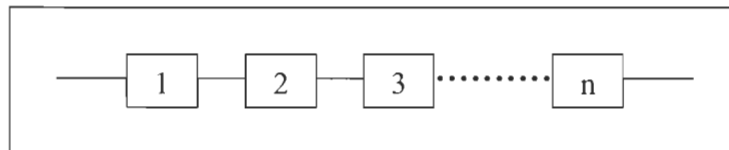


Figure 4 : Système série

La fiabilité d'un système en série est calculée par la relation suivante :

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) . \quad (13)$$

b) Configuration en parallèle

Un système en parallèle fonctionne si au moins un de ces composants fonctionne.

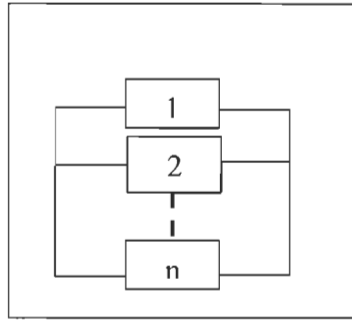


Figure 5 : Système parallèle

La fiabilité pour ce système est donnée par :

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (14)$$

c) Configuration en redondance

Soit l'hypothèse que les composants du système sont indépendants et identiquement distribués. ($R_i = R$; $i=1,2,3...n$).

Forme active m parmi n

Un système en redondance active **m** parmi **n** fonctionne si au moins **m** parmi les **n** composants redondants fonctionnent. (Lewis, E.E. A. (1994)).

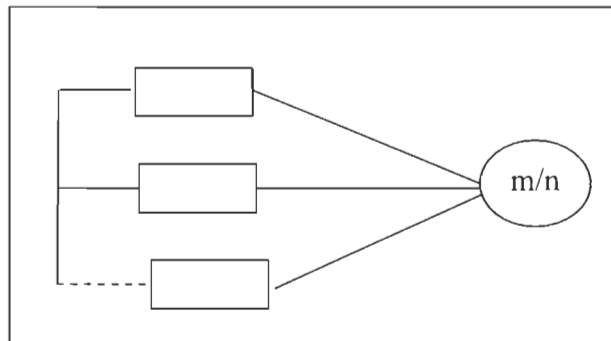


Figure 6 : Redondance m parmi n

Pour ce type de système, la fiabilité s'écrit comme suit :

$$R_s(t) = \sum_{j=m}^n C_n^j R^j (1-R)^{n-j} \quad (15)$$

Avec : $C_n^j = \frac{n!}{j!(n-j)!}$

Forme passive

Dans une redondance passive les composants redondants ne sont mis en service que lorsque les composants du système sont défaillants. Dans l'exemple de la figure 7 à deux Composantes en redondance passive, le deuxième composant est mis en service lorsque le composant principal est défaillant.

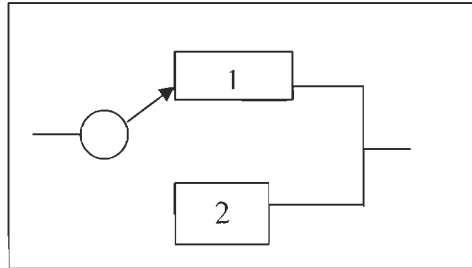


Figure 7 : Redondance Passive

La fiabilité de ce système est donnée par :

$$R_s(t) = R(t) + \int_0^t f(\tau)R(t-\tau)d\tau \quad (16)$$

Avec τ est le temps de la mise en opération du composant en attente et aussi le temps de panne du composant principal. (Lewis, E.E. A. (1994)).

Les différents paramètres, comme entre autres: les instants d'occurrence des pannes qui se produisent de manière imprévisible, le nombre total de défaillances, les intervalles inter défaillances et l'intensité des pannes mettent en évidence le comportement aléatoire de la maintenance qui est en relation avec les processus stochastiques comme le processus de poisson et, en particulier, le processus de renouvellement.

Le système de production qui concerne cette étude, est plus détaillé dans le chapitre de la modélisation « description du système réel » et dans lequel les caractéristiques du stock tampon sont définies.

Le prochain chapitre présente une revue bibliographique : concernant les stratégies de maintenance qui sont considérées comme un facteur primordial dans l'évaluation de la performance des systèmes productifs.

CHAPITRE 3

LES STRATÉGIES DE MAINTENANCE

3.1. INTRODUCTION

De nos jours, l'amélioration de la productivité du point de vue qualité et quantité s'articule, entre autre, sur l'optimisation des stratégies de maintenances. Ces dernières présentent l'ensemble des décisions opérationnelles qu'on doit entreprendre pour maintenir un système en bon fonctionnement.

Ce chapitre aborde deux parties : la première est consacrée aux stratégies de maintenance des systèmes mono composant. La deuxième partie s'intéresse aux systèmes multi - composants.

3.2. LES STRATÉGIES MONO COMPOSANT

Cette partie définit : les caractéristiques, le déroulement du processus des stratégies de maintenances et le modèle analytique lié aux différentes politiques. Pour commencer, lorsqu'un système simple ou un composant tombe en panne, il peut être soit réparé, ou remplacé par un autre neuf ou bien usagé. Dans certains cas, on essaye de prévoir les pannes avant leurs occurrences, soit par inspection ou détection.

Dans ce contexte, on distingue deux types de maintenance :

- ❖ Les politiques préventives,
- ❖ Les politiques correctives.

3.2.1. Les politiques de remplacements

Cette stratégie consiste à faire un remplacement lorsque le composant tombe en panne à cause de son état de détérioration, ou bien atteint un âge **T** bien défini. (Nakagawa, T et Mizutani, S. (2008), Crocker, J et Kumar, U.D. (1999), Fleurquin, G et al. (2006) et Wang,H et Pham,H. (1999)).

Par l'application de ces stratégies de remplacement sur des composants fonctionnels et autres non opérationnels, on cherche toujours à minimiser le coût moyen total $C(t)$ qui s'écrit sous la forme suivante :

$$C(t) = c_1 E(N_1(t)) + c_2 E(N_2(t)) \quad (1)$$

Avec :

- c_1 : Le coût de remplacement des pièces en panne (arrêt de production, le remplacement).
- c_2 : Le coût de remplacement des pièces fonctionnelles.
- $E(N_i(t))$: Le nombre moyen total des composants remplacés entre 0 et t .

a) Les stratégies de type âge

En effet, cette stratégie introduite par Barlow et Proschan (1965) consiste à remplacer préventivement un composant, une fois qu'il atteint l'âge T ($0 < T \leq \infty$), T étant le temps de remplacement planifié. Si toutefois une panne survient, le composant défaillant est remplacé par un autre neuf.

Le déroulement de la stratégie est lié à la génération d'un instant de panne t^* par une fonction aléatoire. Ce processus est illustré dans la figure 12.

En générant un instant de panne t^*

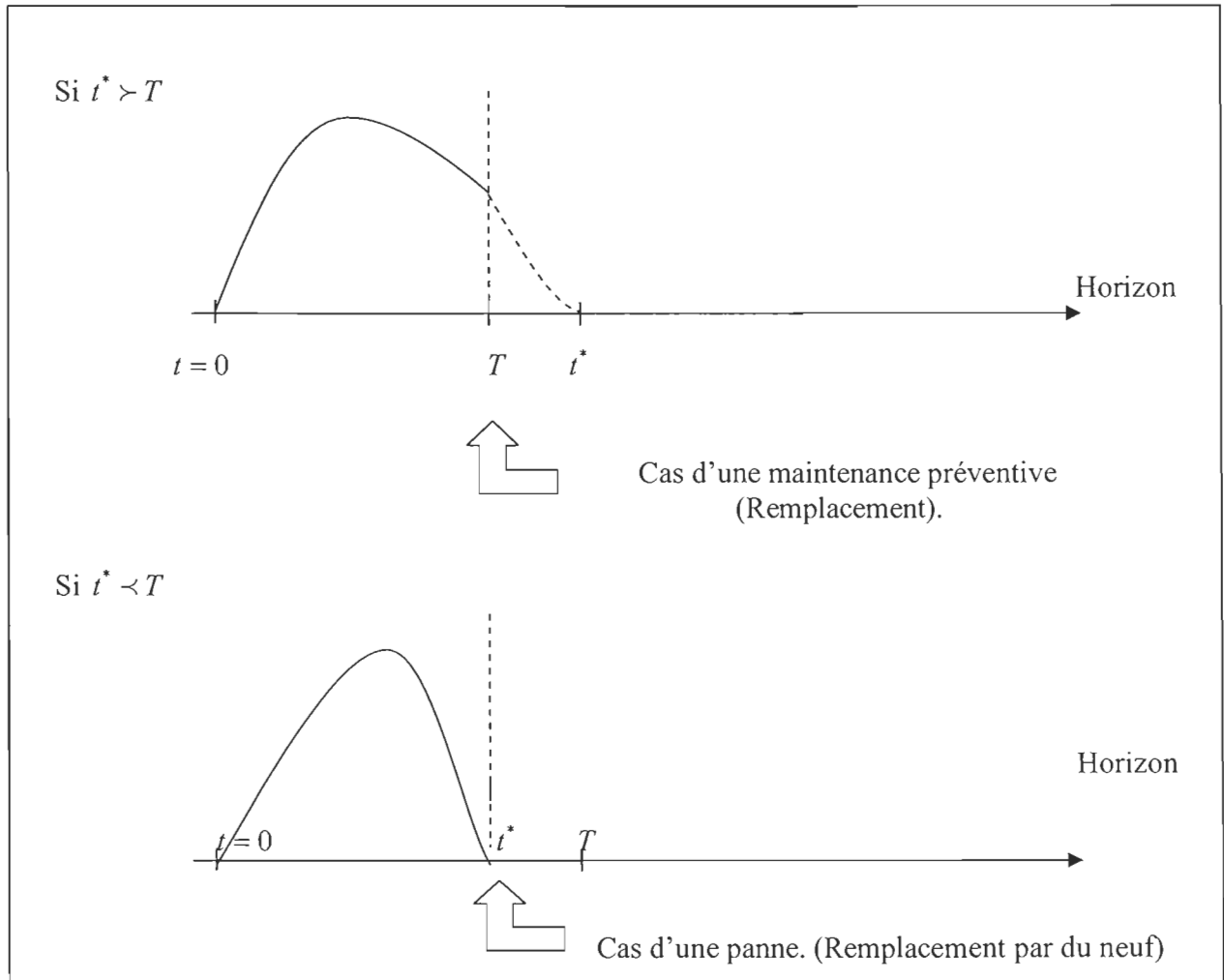


Figure 12 : Séquence d'événement pour la stratégie de maintenance de type âge

Le coût moyen total par unité du temps dans un horizon infini s'écrit comme suit :

$$C_u(T) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C(t)}{t} = \frac{c_1 F(T) + c_2 \bar{F}(T)}{\int_0^T \bar{F}(t) dt} \quad (2)$$

Avec :

- ❖ $F(T)$: La fonction cumulative de répartition des pannes entre 0 et T ,
- ❖ $\bar{F}(T)$: La fiabilité du système,

$$\diamond \int_0^T \overline{F}(t) dt : \text{Le temps moyen par cycle de longueur } T.$$

Si $T = \infty$, la stratégie compte faire des remplacements uniquement à la panne. Cette solution est onéreuse dans le cas où les remplacements à la panne sont plus coûteux que les remplacements préventifs. Ainsi le coût moyen total s'écrit :

$$C_u(\infty) = c_1 \lambda. \quad (3)$$

Avec λ est le taux de pannes du système.

Le temps optimale T^* de la stratégie, qui minimise le coût total moyen par unité du temps doit vérifier nécessairement la condition:

$$\frac{dC_u(t)}{dt} = 0 \quad (4)$$

b) Stratégie de maintenance de type bloc

Remplacement par du neuf

Cette stratégie est définie comme suit :

- ✓ Faire des remplacements préventifs, par de l'équipement neuf aux instants kT ($k=1, 2, 3, \dots$) sans tenir compte de l'âge et de l'état du composant,
- ✓ Le plus souvent cette politique est appliquée sur des systèmes multi-composants formant des groupes d'équipements ou des **blocs**,
- ✓ Si une panne se produit entre deux périodes de remplacements préventifs, l'équipement est remplacé par du neuf.

Dans la suite, le processus de déroulement de ce type de remplacement est bien mentionné dans la figure 13.

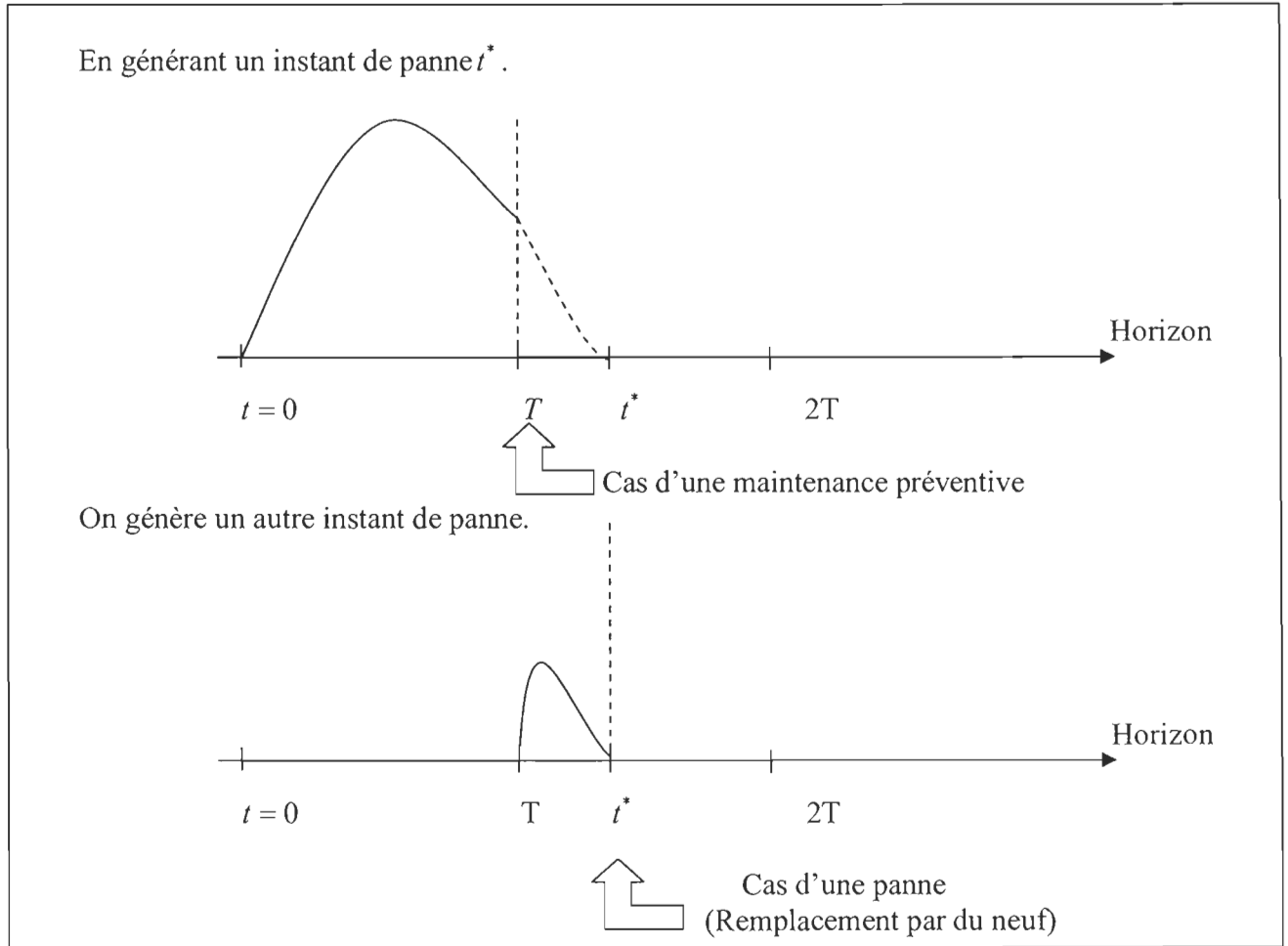


Figure 13 : Séquence d'événement pour la stratégie de maintenance de types bloc (BRP)

D'après Barlow et Proschan (1965), la fonction objective à minimiser s'écrit sous la forme suivante :

$$C_u(T) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C(t)}{t} = \frac{c_1 M(t) + c_2}{T} \quad (5)$$

Avec :

$M(t)$: C'est le nombre moyen des composants défectueux durant un cycle T .

Si $T = \infty$, alors il y aura des remplacements à la panne avec un coût moyen $C(\infty)$ tel que :

$$C(\infty) = \lambda c_1 \quad (6)$$

Pour optimiser la fonction objective, on doit satisfaire la condition suivante :

$$\frac{\delta C_u(T)}{\delta T} = 0 \quad (7)$$

Ce qui donne la valeur optimale T^* qui satisfait la formule suivante :

$$Tm(T) - M(T) = \frac{c_2}{c_1} \quad (8)$$

D'où, le coût optimal s'écrit comme suit :

$$C_u(T^*) = c_1 m(T^*) \quad (9)$$

Remplacement effectuant une réparation minimale

Certaines littératures suggèrent d'effectuer une réparation minimale à la panne au lieu de remplacer l'équipement par un neuf. (Wildeeman et al, (1995); Ben Daya, M et Alghamdi, A.S. (2000), Thomas, W et al, (1996)). Cette action corrective permet de remettre le composant brisé en état d'opération sans affecter son taux de panne. Dans la pratique, la réparation minimale est équivalente à remplacer l'équipement défectueux par un autre en état d'opération ayant le même âge à l'instant de panne.

En fait, cette stratégie se définit comme suit :

- Le remplacement préventif par du neuf se réalise chaque kT ,
- Si une panne survient entre les périodes de remplacements préventifs, une réparation minimale est appliquée pour remettre l'équipement brisé en état d'opération.

Le déroulement de la stratégie est illustré dans la figure 14 :

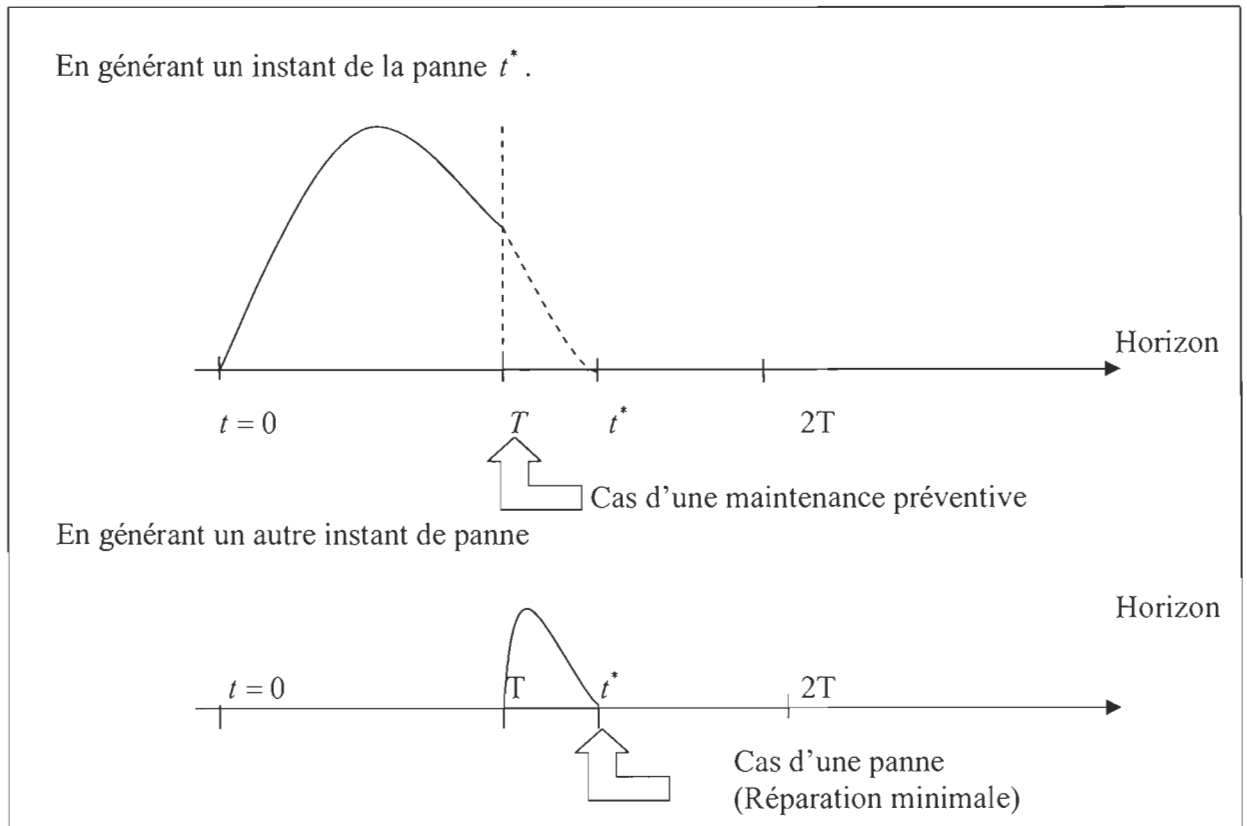


Figure 14 : Séquence d'événement pour la stratégie de maintenance de types bloc (BRP) avec réparation minimale

Le coût total moyen par unité du temps sur un horizon infini est donné par :

$$C(T) = \frac{c_m \cdot \int_0^T r(t) dt + c_p}{T}; \quad T > 0 \quad (10)$$

Avec :

$\int_0^T r(t) dt$: La fonction de Hasard avec $r(t)$ est le taux de panne de l'équipement.

c_m : Le coût d'une réparation minimale d'un composant brisé entre deux instants de remplacements préventifs.

c_p : Le coût de la maintenance préventive.

Pour déterminer la valeur optimale T^* , on a besoin de résoudre l'équation suivante :

$$\frac{dC(T)}{dT} = 0 \quad (11)$$

Par dérivation, on obtient l'expression définie par :

$$c_m \cdot (T \cdot r(T) - \int_0^T r(t) dt) - c_p = 0 \quad (12)$$

On a donc un minimum pour $T = T^*$. Pour que cette solution soit unique, deux conditions doivent être vérifiées :

- La pente de $C(T)$ doit être négative pour $0 < T < T^*$, c'est-à-dire :

$$(T^* r(T^*) - \int_0^{T^*} r(t) dt) < \frac{c_p}{c_m} \quad (13)$$

- La pente de $C(T)$ doit être positive pour $T^* < T < \infty$, alors :

$$(T^* r(T^*) - \int_0^{T^*} r(t) dt) > \frac{c_p}{c_m} \quad (14)$$

Le taux de panne $r(T)$ est une fonction croissante, ces deux conditions sont vérifiées et la solution est unique à $T = T^*$.

Au point optimum, le coût moyen total par unité du temps s'écrit comme suit :

$$C(T^*) = c_m \cdot r(T^*) \quad (15)$$

Pour terminer cette partie, le tableau 4 est conçu dans le but de résumer les autres littératures en relation avec les différentes stratégies de maintenance situées précédemment.

Tableau 4 : Récapitulation des littératures visant les stratégies de maintenance mono composant

Nom auteur(s)	Type de stratégie	Description de la stratégie
Thibaut, L et al. (2005)	Remplacement de type âge.	Cette politique compte réaliser des changements préventifs des composants défaillants chaque intervalle T , à condition que leurs risques de pannes atteignent un seuil S bien défini et qui présente la probabilité conditionnelle de défaillance entre les dates kT et $(k+1) T$. Ce sont les stratégies basées sur le risque.
Tahara et Nishida (1975)	Remplacement de type âge.	Cette stratégie consiste à remplacer l'unité une fois qu'elle atteint un t' heure de fonctionnement, tel que t' appartient à $[0;T]$. Si $t'=0$ alors on parle d'âge de remplacement et si $t'=T$, ce sont des remplacements périodiques avec des réparations minimales.
Nakagawa (1984)	Remplacement de type âge.	Cette politique de type âge revient à remplacer une unité à l'âge T ou après N nombres de pannes avec l'introduction de la réparation minimale entre les instants de remplacements.
Block et al (1993)	Remplacement de type âge.	La politique examinée consiste à remplacer préventivement un composant après un petit temps où il se trouvait en état de réparation.
Berg et Epstein (1976)	Remplacement de type bloc	Les auteurs ont modifié la stratégie du bloc de remplacement en fixant un âge t' bien défini. En effet, si à la période de remplacement préventif le composant est défaillant, alors il est remplacé par un neuf sinon on vérifie son âge, s'il est inférieur à t' , alors le composant demeure opératoire jusqu'à l'occurrence d'une panne ou jusqu'au prochain remplacement kT . C'est le cas des stratégies de maintenance modifiées

Tango (1978)	Remplacement de type bloc	<p>L'auteur suggère une extension du bloc de remplacement se résumant dans les points suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Aux périodes de remplacements kT, les composants sont remplacés par des nouveaux, ✓ Les composants en panne sont remplacés soit par des nouveaux ou par des usagés. ✓ Si l'âge du composant est inférieur à un r bien défini, alors il est remplacé par un autre nouveau, sinon il sera remplacé par un autre usagé, ✓ Si $r=t$, on parle ici du bloc de remplacement,
Nakagawa (1980 ,1968).	Remplacement de type bloc	<p>Ce remplacement se récapitule dans les points suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Un composant est remplacé à chaque kT intervalle, indépendamment de son âge, - Un composant défaillant demeure en service jusqu'au prochain remplacement, - Les variables de décisions sont n et T, avec n c'est le nombre des pannes, - Si le nombre de pannes excède n, alors le remplacement sera fait à la prochaine période, bloc de remplacement. - Si le n tend vers l'infini, on parle de remplacement périodique avec de RM à la panne,
Wang et Pham (1999)	Remplacement de type bloc	<p>Ces auteurs généralisent la politique du bloc de remplacement de la manière suivante:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Le composant est imparfaitement réparé, si le nombre de réparations est inférieur à N, ✓ La durée de vie de chaque composant décroît avec le temps,

		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sur N réparation imparfaite, le composant est maintenu préventivement à chaque kT intervalle, ✓ Les variables de décisions sont N et T, ✓ L'avantage de cette politique est que les réparations initiales sont moins coûteuses, ✓ Si N est infinie et que PM sont parfaits, on parle du bloc de remplacement, ✓ Si N est infinie et que PM sont parfaits avec des RM, on parle des remplacements périodiques,
Min-Tsai, L (2007)	Coût limite de réparation	<p>Cette stratégie développée est définie comme suit :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La décision de remplacement ou de réparation du composant est prise à partir d'une seule intervention de maintenance, • Le remplacement préventif se fait à chaque cycle de période T, • Deux types de défaillance sont pris en considération : Les pannes mineures et les pannes sérieuses ou catastrophiques. • Dans le cas des pannes sérieuses, le composant est remplacé par du neuf, • Dans le cas des défaillances mineures, une réparation minimale RM est recommandée à condition que le coût limite de réparation évalué n'excède pas un seuil L. • Si toutefois, le coût de réparation cumulative dépasse le seuil limite L. Le composant est remplacé par du neuf.
Dohi et al (2001),	Temps limite de réparation	<p>cette politique de maintenance est définie comme suit :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Un temps limite de réparation t_0 est estimé à l'avant, • Si le composant tombe en panne, la réparation commence immédiatement, • Si la durée de la réparation est inférieure à la limite de réparation t_0, alors le composant demeure fonctionnel. • Dans le cas contraire, la réparation est interrompue et le composant défaillant sera jeté au recyclage, en attendant qu'il soit remplacé par une nouvelle unité,

		<ul style="list-style-type: none"> • La période de livraison de la nouvelle unité est L. • L'auteur développe une méthode graphique nommée TTT (Total Time on Test), pour déterminer la valeur optimale t_0^*.
Nakagawa, T et Mizutani, S (2008)	La maintenance préventive séquentielle	<p>Le déroulement de cette politique se résume dans les points suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La maintenance préventive est imparfaite, • La stratégie PM est appliquée de manière périodique chaque kT, • Après la $k^{\text{ème}}$ PM, le nombre total cumulatif de défaillances Z_k se réduit à aZ_k ($0 < a < 1$), (facteur d'ajustement) • Si toutefois, le composant tombe en panne entre les périodes de remplacements, une réparation minimale RM est appliquée, • Les chocs, causant les dommages des composants, suivent une loi de poisson, telle que : <ul style="list-style-type: none"> - W_k est le dommage du composant atteint durant la période k. - $Z_k = \sum_{j=1}^k a^{k-j} W_j$, Avec $k=1, 2, 3, \dots$ etc. • Le composant est remplacé dans le cas où le dommage total dépasse un seuil K ou bien à l'occurrence d'une panne causant son dysfonctionnement.
Lin et al. (2000)	La maintenance préventive séquentielle	<p>En effet, la maintenance préventive séquentielle est présentée par deux modèles :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Modèle I lié à la fonction de Hasard, - Modèle II lié à la réduction d'âge, - Proposition d'un modèle hybride plus efficace.

3.3. LES STRATÉGIES MULTI-COMPOSANTS

Ces types de stratégies visent le système complexe qui se définit comme l'ensemble constitué des sous-systèmes ou des composants en interaction et qui sont organisés de façon à atteindre un objectif (Thomas, 1986).

3.3.1. Les critères de classification des stratégies de maintenance multi composants

Selon Dekker et al. (2006), les principaux critères de classification des modèles de maintenance multi-composants se divisent en trois catégories :

- La dépendance inter composants,
- L'aspect de planification,
- La méthode d'optimisation adoptée.

a) La dépendance inter composants

En effet, la gestion individuelle des composants constituant le système complexe est en fonction de leur dépendance structurelle, économique et stochastique. (Dekker et al. (2006, 1996)).

- La dépendance économique

On distingue deux types de dépendance économique.

- **La dépendance économique positive** : Cette dépendance implique que le coût de maintenance peut se réduire quand plusieurs composants sont maintenus conjointement et non séparément. (Dekker et al. (2006, 1996)).

En fait, la défaillance d'un composant offre l'occasion d'entreprendre, en même temps, des actions de maintenance dites opportunistes sur d'autres composants du système, et ainsi, on peut tirer profit d'éventuelles économies d'échelles.

- **La dépendance économique négative** : La dépendance négative se produit quand le coût de la maintenance d'un groupe de composants est plus cher que celui de la maintenance d'un seul composant. (Dekker et al. (2006)). En effet, cette forme négative est la conséquence des raisons suivantes :

- La nécessité d'une main- d'œuvre hautement qualifiée,
- Des exigences de sécurité qui interdisent l'intervention commune,
- La combinaison entre la maintenance corrective et préventive pour le cas des systèmes en redondance n'est pas bénéfique, ce qui provoque une perte de production.

Le cas de k/n systèmes combine entre les deux formes de dépendance négative et positive.

- **La dépendance stochastique** : Cette dépendance implique que le dysfonctionnement d'un composant peut influencer l'état des autres. (Dekker et al. (2006, 1996))
- **La dépendance structurelle** : Elle signifie que pour accéder aux composants défectueux pour les remplacer ou les réparer, on doit démonter d'autres composants. (Dekker et al. (2006,1996)). La dépendance structurelle entraîne une dépendance stochastique.

b) Aspect de planification

Dans la littérature, l'aspect de planification présente l'horizon du travail considéré qui peut être soit fini ou infini, continu ou discret. (Dekker et al. (2006, 1996, 1995), Wildeman, R.E et al. (1996)). Pour le cas infini, on parle des modèles de maintenance stationnaires, alors que pour le cas fini, ce sont des modèles dynamiques.

*** Les méthodes d'optimisation**

Selon la littérature, les méthodes d'optimisation sont soit exactes ou heuristiques, et elles peuvent se regrouper comme suit :

- Les méthodes mathématiques, (Goyal et al. (1985); Dekker et al. (1995); Richard et al. (2001); Pham et Wang. (1996), Crocker et Kumar. (1999)).
- Le couplage entre la simulation et l'optimisation, (Ait. Kadi, D et al. (1999); Azadivar, F. (1992); Fleurquin. G et al. (2006)).
- Les algorithmes génétiques. (Dragan et al. (1995); Saranga, H. (2004)).

Pour ce travail, on adopte la méthode de simulation via ARENA combinée avec la technique d'optimisation via OPTQUEST pour évaluer la performance des systèmes productifs.

c) Les types des stratégies de maintenances multi-composants

Les stratégies de maintenance des systèmes complexes peuvent se classer en trois catégories :

- La maintenance opportuniste (corrective/préventive),
- La maintenance corrective, (des remplacements correctifs ou des réparations minimales),
- La maintenance préventive. (des remplacements préventifs).

* Remplacements de type Bloc

Quant à cette politique, les remplacements préventifs sont effectués de manière périodique chaque kt_0 ($k=1, 2, 3, \dots$), indépendamment de l'âge et l'état du système, sur un ensemble des composants. Si toutefois des pannes surviennent entre $[(k-1)t_0, kt_0]$, des maintenances correctives sont appliquées.

L'inconvénient de cette politique consiste à remplacer des composants tous neufs. Pour ce faire, des extensions relatives à ce type de remplacements sont mises en place :

Remplacement indépendant de type block

- Remplacer préventivement les composants i aux instant $k_i T_i : (k_i = 1, 2, 3, \dots)$ / si par exemple, $k_1 T_1 = k_2 T_2$, on remplace les composants 1 et 2.
- Si toutefois une panne survient, les composants défectueux sont remplacés.

Remplacement groupé de type block

- Remplacer préventivement les composants à $kT : (k = 1, 2, 3, \dots)$
- En cas de panne, remplacer les composants défectueux.

Remplacement combiné de type block

- À la panne, remplacer les composants défectueux et opérationnels.
- Remplacer préventivement les composants à $kT : (k = 1, 2, 3, \dots)$

* Remplacement modifié de type block : MBRP

Remplacement indépendant

- Remplacer préventivement aux instants $k_i T_i : (k_i = 1, 2, 3, \dots)$; les composants i , s'ils atteignent ou dépassent l'âge critique prédéfini. (Si par exemple : $k_1 T_1 = k_2 T_2$ et les âges du composant 1 et 2 dépassent les âges critiques, alors on les remplace).
- En cas de panne, les composants défectueux sont soit remplacés ou bien subissent des réparations minimales.

Remplacement Groupé

- Remplacer préventivement à $kT : (k = 1, 2, 3, \dots)$ intervalle fixe, les composants qui atteignent leurs âges critiques,

- Remplacement correctif pour les composants défaillants.

Remplacement combiné

- À la panne, remplacer simultanément tous les composants du système même s'ils sont encore fonctionnels,
- Si les composants atteignent leurs âges critiques, ils doivent être remplacés.

*** Remplacement de type âge**

Cette politique consiste à remplacer préventivement un ensemble de composants, une fois qu'ils atteignent un âge T ($0 < T \leq \infty$), T étant le temps de remplacement planifié. Si toutefois une panne survient, les composants défaillants sont remplacés soit : par des neufs, usagés ou des réparations minimales sont appliquées.

3.4. Tableaux récapitulatifs

Le tableau 5 résume les principaux travaux qui sont intéressés aux stratégies de maintenances multi-composantes.

Tableau 5 : Revue de la littérature sur les stratégies de maintenances multi-composantes

Type de stratégie	Description	Nom auteur(s)
Revue bibliographique sur les stratégies de maintenance multi-composantes	<ul style="list-style-type: none"> - Définir un système complexe, - Mettre le point sur les différentes dépendances inter composants (économique (positive/négative); stochastique; structurelle). - Mentionner les critères de distinction entre les stratégies de maintenance multi-composantes, entre autre : (groupement direct, stationnaire, indirect, dynamique; aspect de planification, etc.). 	Nicolai, R.P Dekker. R (2006) et Dekker, R et al (1996, 1997,)
Maintenance préventive (AG&BR)	<p>L'objectif du travail est de déterminer la valeur du temps optimale t_b^* pour appliquer la politique de maintenance (ARP&BRP) sur un groupe de composants.</p> <p>Pour le mono composant et les multi-composants, la même définition est admise pour le cas des remplacements de type block (BRP). La fonction objective pour les systèmes complexes s'écrit comme suit :</p> $g_b(t) = \frac{c^p + \sum_{i=1}^n c_i^f M_i(t)}{t}; t \geq 0$ <p>Pour les remplacements de type block, les auteurs ont mis en place un critère de décision, sous forme d'une équation, permettant de choisir une des deux options suivantes :</p> <ol style="list-style-type: none"> Faire le remplacement de tout le groupe, Reporter le remplacement pour une période ultérieure. <p>Si $t \geq t_b^* \rightarrow \sum_{i=1}^n c_i^f m_i(t) - g_b^* \geq 0$, l'option (a) est la meilleure. Sinon on choisit l'option (b).</p> <p>Pour les remplacements de type âge, la description de la stratégie est plus simple pour le cas mono composant que pour celui des multi composants. En effet, pour DT on peut se baser sur la décision Markovienne pour faire les remplacements.</p> <p>Dans le cas CT, un critère de décision est mis en place.</p> <p>Pour un groupe de n composants, le remplacement se réalise si un de ces composants atteint un âge t ou bien un seuil jugé optimal.</p> <p>Pour vérifier certains résultats, les auteurs se sont basés sur la simulation.</p>	Dekker et Roelvink. (1995)

Maintenance opportuniste (Réparation minimale)	<p>Les auteurs proposent deux nouvelles politiques de maintenances opportunistes (k de n systèmes) avec deux variables de décisions (τ, T). Dans ces deux politiques, on adopte la RM avant le temps τ et y, après on combine entre CM et PM (dans le cas de maintenance parfaite).</p> <p>- Comme ils ont introduit, à ces deux politiques de maintenances opportunistes, une nouvelle variable de décision présentée par le nombre de pannes des composants (CM).</p>	Pham et Wang (2000)
Maintenance opportuniste (politique de remplacement)	<p>Les auteurs examinent des réparations opportunistes d'un système multi-composants avec (n+1) sous-systèmes :</p> <p>- Si le sous-système i tombe en panne entre 0 et t', alors on le remplace à un coût C' à un temps w'.</p> <p>- Au cas où le système tombe défaillant entre t' et T, on le remplace et on applique un PM. Le coût total de maintenance est C'' et le temps de maintenance est W''.</p>	Wang, H. (2001)
Politique d'inspection	<ul style="list-style-type: none"> - Dans ce cas, les pannes de la balance sont détectées par inspection. - Les auteurs ont mis le point sur deux politiques d'inspection. - La première politique consiste à inspecter la balance chaque $i.T$ ($i=1, 2, 3, \dots$) afin de détecter l'existence des pannes. T^* - La deuxième politique compte détecter la balance chaque jour avant le début du travail. Dans ce cas, l'inspection se réalise à $\frac{i\tau}{N}$ ($i=1, 2, 3, \dots$) avec τ et N signifient, respectivement, les heures du travail et la fréquence d'inspection par jour. - À travers ces politiques de maintenance, les auteurs cherchent à optimiser les fonctions objectives suivantes : <ul style="list-style-type: none"> • La fraction de défaillances, • Le coût moyen par unité du temps. 	Sandoh, H et Igaki, N. (2003)
Maintenance préventive (Remplacement préventif et correctif)	<p>Cet article développe une politique de remplacement optionnel d'un système de deux différents composants agencés selon une configuration en série.</p> <p>En fait, cette stratégie compte :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Remplacer les composants défectueux, - Remplacer le composant au cas où il atteint ou dépasse un âge de remplacement préventif à l'occurrence d'une opportunité (panne de l'autre composant). - Les deux composants sont non identiques et possèdent chacun un taux de panne différent. 	Ouali, M et Yacout, S. (2003)

	<ul style="list-style-type: none"> - Le composant 1 est caractérisé par un taux croissant. Toutefois, le deuxième possède un taux constant. - Le composant 1 est un sujet de remplacement correctif et préventif. - Le composant 2 est remplacé à la panne. - Si le taux de panne de deux unités est croissant, la maintenance préventive est recommandée pour les deux. - L'objectif du travail est de déterminer la valeur optimale du composant 1 minimisant le coût total moyen par unité du temps sur un horizon infini. <p>Dans le cas où le taux de pannes des composants est croissant, la résolution analytique se révèle complexe et délicate. Par conséquent, ce constat amène à explorer le potentiel de la simulation pour optimiser la stratégie de remplacement optionnel et calculer les valeurs (T_1^*, T_2^*).</p>	
Remplacement périodique de type âge.	<p>Le modèle proposé par Lai et Chen (2005), se résume dans les points suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le système étudié est constitué de deux composants configurés en séries. - La panne du composant 1 est réparable par application d'une réparation minimale, - L'occurrence des pannes du composant 1 suit une loi du poisson non homogène, - La défaillance du composant 1 cause certains dommages au composant 2, - Le taux de pannes des deux composants est croissant en fonction du temps, dû au processus de vieillissement. - Les deux composants sont remplacés à l'âge T ou à la panne, 	Lai, M et Chen, Y. (2005)
Maintenance opportuniste	<ul style="list-style-type: none"> - Le but du travail est d'identifier un modèle de simulation afin d'étudier deux types de stratégies de maintenance opportunistes et de faire des mesures concernant le seuil d'opportunité. - À l'aide de ce modèle de simulation, les chercheurs sont arrivés à déterminer le seuil optimal d'opportunité de chaque stratégie de maintenance opportuniste qui vise à minimiser les coûts totaux de maintenance. 	Ouali, M.S. et al (1999)

Remplacement de type Âge. (Préventive et corrective)	<ul style="list-style-type: none"> - Le but est de développer un modèle mathématique permettant de calculer les temps optimaux de l'âge de remplacement d'un composant et l'âge du rejet, ce modèle est interprété par la méthode de simulation de Monte Carlo qui a bien vérifié l'effet de l'âge sur les variations des coûts de remplacement et du rejet des composants. 	Crocker, J et Kumar, U. (1999)
Maintenance Opportuniste	<ul style="list-style-type: none"> - Découverte d'une nouvelle méthode d'optimisation nommée (Algorithme Génétique) permettant d'optimiser la maintenance opportuniste dans les systèmes complexes. - Obtention d'une solution optimale qui permet de savoir si le composant d'un système complexe a besoin d'une maintenance opportuniste ou non; ce qui évite les arrêts du temps qui peuvent coûter cher surtout dans le cas des systèmes complexes. 	Saranga, H (2004)
Maintenance Opportuniste	<ul style="list-style-type: none"> - Description et formulation d'un algorithme génétique afin d'optimiser les coûts de remplacement. 	Savic, D et al (1995)
Maintenance Opportuniste	-Utilisation d'un modèle mathématique pour déterminer la politique optimale de la maintenance opportuniste, en présentant deux cas (maintenance parfaite et imparfaite).	Hoang, P et Wang, H. (1996)
Maintenance opportuniste	<ul style="list-style-type: none"> - Le but du travail est de développer un modèle mathématique d'optimisation plus flexible à l'influence des différentes variables attachées à la maintenance multi-composants. - Dépendance économique inter composants. - Type de groupement des composants. 	Wildeman. R.E et Dekker. R (1996)
Maintenance opportuniste	<ul style="list-style-type: none"> - L'objectif du travail est d'évaluer la performance des politiques de maintenance opportuniste appliquées sur un ensemble de composants à l'aide d'un outil de simulation (Fortran), dans le but de choisir la politique la plus performante. 	Neelakanteswara, A.R et Bhadury. B (2000)

Maintenance (Remplacements)	<ul style="list-style-type: none"> - Revue sur les modèles mathématiques appliqués pour optimiser les politiques de maintenances mono et multi-composants. - Critique et interprétation des différents modèles adoptés. 	Scarf. P.A. (1997)
Maintenance préventive	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation d'un modèle mathématique pour déterminer la politique de maintenance préventive la plus optimale. - Les critères sont le coût de maintenance et le nombre d'interventions des activités de maintenance. 	Ben daya. M et Alghamdi .A.S. (1999)
Maintenance préventive	<ul style="list-style-type: none"> - Montrer l'influence de la performance de la maintenance préventive sur la réduction du coût tout en assurant la qualité et la quantité économique la plus optimale. 	Ben Daya, M. (2001)
Remplacement correctif et préventif. (âge et bloc)	<ul style="list-style-type: none"> - Développer une plate forme (OPTIMAIN) destinée à aider le gestionnaire dans sa tâche et lors de la prise de décision. - OPTIMAIN s'oriente vers l'élaboration de stratégies de maintenance de systèmes complexes en mettant en place une approche de modélisation combinant la simulation avec la modélisation. - Le but de la plate-forme est de minimiser le coût relatif aux stratégies de maintenances appliquées et de maximiser la disponibilité du système. - En outre, la plate-forme a comme objectif d'offrir une aide à la décision pour trouver le meilleur compromis entre fiabilité et contraintes économiques. 	Fleurquin, G et al. (2006)
Remplacement de type âge, bloc et bloc modifié / opportuniste	<ul style="list-style-type: none"> - Étudier le cas d'un système formé par deux composants en séries et qui sont en dépendance stochastique, - Présentation des différentes politiques de maintenance de type bloc, comme : Indépendant, groupé et combiné. 	Scarf, P.A Deara, M. (1998)

	<ul style="list-style-type: none"> - La même chose pour le cas des remplacements de type bloc modifiés. - Pour les cas opportunistes, il y a deux cas : indépendant et groupé. 	
Maintenance préventive et corrective. (Remplacements)	<ul style="list-style-type: none"> - Le but du travail est de déterminer la fréquence optimale d'application de la maintenance préventive sur un système à n composants configurés en séries, permettant de minimiser le coût de la maintenance et d'assurer la disponibilité du système. 	Caldeira Duarte. J.A. (2006).
Maintenance préventive et corrective (des réparations minimales; Remplacement de type bloc)	<ul style="list-style-type: none"> - Définir une nouvelle approche sous forme d'un algorithme mathématique, en se basant sur le modèle de Goyal et Kusy, dans le but d'optimiser une politique de maintenance préventive multi composants. - La politique compte faire des remplacements préventifs, chaque $k_i T$, sur un groupe i de composant et en cas de panne, une réparation minimale est appliquée. 	Wildeman. R. E et al. (1995)
Maintenance préventive (Remplacement de type bloc modifié MBRP)	<ul style="list-style-type: none"> - Explication du principe de remplacement de type bloc modifié (MBRP). - Calcul de la fonction objective à optimiser : le coût de maintenance $C(b, t)$. - Adopter une distribution suivant la loi Erlang. 	Berg. M et Epstein. B. (1976)
Maintenance préventive (Remplacement périodique)	<ul style="list-style-type: none"> - Formulation du modèle de Goyal et Kusy, - L'objectif est de déterminer la valeur économique de fréquence de maintenance permettant de minimiser la fonction du coût total. - Traitement d'un exemple. 	Goyal. S.K et Kusy. M. I. (1985)
Remplacement de type bloc standard, modifié et de type âge.	<ul style="list-style-type: none"> - Explique le principe de déroulement des différents remplacements de types bloc et âge. - Le temps de travail est discret. - Comparaison entre les différentes politiques : ARP, MBRP, SBRP. 	Archibald. T. W et Dekker. R. (1996)

Remplacement de type âge (discret et continue).	<ul style="list-style-type: none"> - Formuler les fonctions objectives relatives aux remplacements de type âge sur un temps continu et discret. - Faire une application numérique. 	Nakagawa. T. (1985)
Remplacement de type Bloc	<ul style="list-style-type: none"> - Remplacement de type bloc pour un système multi composants. - Défaillance des composants est due aux chocs. 	Sheu, S. H et Jhang, J. P. (1998)

Dans le cadre de ce projet, seulement les trois types de politiques de maintenance les plus publiées dans la littérature sont retenues et elles sont orientées vers un système multi-composants, à savoir : **ARP**, **BRP** et **MBRP (indépendant)**.

Le tableau 6 fournit une idée sur les travaux qui ont été déjà effectués sur l'évaluation des lignes de production en fonction des différents facteurs expérimentaux, comme par exemple : les politiques de maintenance, le temps d'opération des machines, etc.

Tableau 6 : Revue de la littérature concernant la performance des systèmes productifs

Auteur	Titre	Résumé
Thomas, W.A et al, 1996	Modified Block replacement for multi component systems	<p>Définir les trois types de politiques de maintenance : ARP, BRP et MBRP, en indiquant la manière dont ils fonctionnent et leurs différents paramètres. Dans la partie résultat, les auteurs comparent les effets de ces stratégies sur un système multi-composants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - MBRP est la meilleure politique pour les cas de 2 composants (3% de différence entre la fonction objective MBRP et BRP) - 10% de différence entre les stratégies MBRP et ARP. - Illustration de différents modes de la stratégie BRP.

Ernest, K.1958	Production Lines and internal storage –A review	<p>Présentation de différentes configurations pour les lignes de production (exemple les industries d'automobiles). Définir les différents paramètres assujettis à la ligne de production à savoir : Temps d'opération (loi de distribution : normal), setting times (planifié ou non : temps de maintenance correctif /préventif, graissage, etc.), la file d'attente, Output (les mesures de performance : temps de passage de la commande, le nombre de commandes complétées, la disponibilité des machines).</p> <p>- Temps d'arrêt (setting time) peut être aléatoire ou constant.</p>
Ait-Kadi, D et al, 2003	Apport de la simulation dans l'analyse de stratégies de maintenance	<p>-Explorer le potentiel de la simulation dans le processus du développement des stratégies de maintenance.</p> <p>-Présentation du langage RAO (Ressources- Action- Opération) comme outil de simulation.</p> <p>- Les stratégies mis en évidences sont la stratégie âge (ARP) et BRP.</p> <p>- Validation du modèle de simulation par comparaison entres les résultats de simulation et analytique.</p> <p>- Utilisation des lois de : Gamma (4,1), Normale (4,0.5), Weibull (1.5, 1) comme des lois de génération des pannes.</p>
Fleurquin,G et al, 2006	Optimain : Plate forme d'élaboration de stratégies de maintenance de systèmes complexes	<p>- Présentation d'une plate-forme nommé OPTIMAIN servant à modéliser et à optimiser les stratégies de maintenance. Cette approche de couplage entre la simulation et le couplage permet de déterminer la politique optimale offrant le coût de maintenance minimal et la disponibilité maximale du système.</p> <p>- Explication des différentes stratégies de maintenance les plus reconnues, comme entre autres:</p>

		<p>ARP, BRP, MBRP, RBS et la stratégie opportuniste.</p> <ul style="list-style-type: none"> - La complexité de certaines stratégies exige l'utilisation d'un outil puissant comme OPTIMAIN, - Détaillant la phase de modélisation du système : - Temps de maintenance préventive ou corrective (constante ou normale), - L'étude du nombre de remplacement préventif ou correctif permet d'émettre une opinion sur la pertinence de la politique (trop de préventif ou non), - Le mode de détection des pannes, (arrêt du système, automatique) - Optimisation des paramètres associés à chacune des stratégies de maintenances, - Les lois de distribution des pannes : Loi de Weibull, - Cas d'étude : un système hybride composé par deux machines en séries et les autres sont parallèles. - Évaluation de la performance des stratégies : la stratégie Âge est la meilleure en termes de coût,
Pichel, D et al	ALIX : une méthode de modélisation des flux d'un système de production	<ul style="list-style-type: none"> - Présentation d'un formalisme graphique de modélisation des flux des systèmes de production. (Alix présente aussi une approche du couplage entre la simulation et l'optimisation). - Le langage adopté est RAO, - Mettre le point sur plusieurs plates- formes de simulations, comme entre autres: SADT, UML. - Comparaison entres Alix et ces deux dernières plates-formes(les apports et les limites).

<p>Meller, R.D et David, S. K. 1996</p>	<p>The Impact of preventive maintenance on system cost and buffer size</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La ligne est composée de deux machines en série avec un ST. - Utiliser la chaîne de MARKOV pour la prise de décision et la mesure de performance. - L'effet de la maintenance préventive est de réduire l'output du système de production et de minimiser les coûts de la maintenance,
<p>Tan, B. 1998</p>	<p>Effects of variability on the due time performance of a continuous materials flow production system in series</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Le cas étudié est une ligne de production formée par N stations en séries sans stock intermédiaire. - Adopter la loi exponentielle comme loi de génération des pannes et $C_{2,b}$ pour le temps de réparation des défaillances. - La mesure de performance est présentée par le nombre complété des commandes. - Voir l'impact de la variabilité du temps de réparation sur la performance de la ligne de production, - La cadence de production suit une loi normale, - Les stations ont les mêmes temps d'opération qui sont considérés constants. Dans ce cas, le stock n'a aucun effet sur la ligne de production, - Résultats : le taux de production décroît en fonction du nombre N de stations travaillant en série - Mesure de la performance : Satisfaction des clients, (demande/offre« quantité produite ») - Tant que le temps de réparation augmente (correctif) la performance de la ligne diminue quelque soit le nombre de stations pris en considération. - L'augmentation du nombre de stations réduit la performance de la ligne de production,

<p>Abdul-Nour,G et al, 1995</p>	<p>Effects of maintenance policies on the just in time production system</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Voir l'impact de quelques facteurs expérimentaux, comme entre autres: le nombre de stations travaillant en séries, les politiques de maintenances à appliquer, temps d'opération, sur la performance d'une ligne de production JIT. - Utilisation d'un plan d'expérience (la méthode de Taguchi) pour tirer les facteurs et les interactions les plus significatifs sur la ligne de production. - Analyser et interpréter les résultats. - Loi de distribution normale pour les pannes et pour le temps de production.
<p>Kevin, B. H. 1991</p>	<p>The Output processes of serial production lines of exponential machines with finite buffers</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Traitement d'une ligne de production formée par N machines en séries et des stocks intermédiaires à capacités finies. - La cadence de production suit une loi exponentielle. - L'étude et l'analyse de cette ligne est fait par la chaine de Markov, - Résultats : - La croissance de la capacité du stock tampon augmente le taux de productivité et la performance de la ligne de production, - Pour le nombre de station travaillant en série, leur croissance provoque une réduction du taux et de nombre de quantité produite.
<p>Cheikhrouhou, N et Rémy, G. 2003</p>	<p>Optimisation de lignes de production via simulation : Une approche basée sur l'analyse de perturbation.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Illustration d'une méthode d'optimisation via simulation pour des lignes de transfert et de production, nommé la technique d'analyse de perturbation (AP), - L'Optimisation des lignes de production est connue sous le problème de dimensionnement de lignes de production, - Mettre le point sur les sources de perturbation d'une ligne ou cellule de perturbation (blocage/famine; temps de service),

<p>Buzacott, J.A. 1971</p>	<p>The role of inventory banks in flow –line production</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Définition de quelques termes pertinents assujettis à la ligne de production, à savoir : le temps de cycle, le temps de production, etc. - Indication de la fonction principale du stock tampon, - Résultats et conclusion : <ul style="list-style-type: none"> • La capacité du stock améliore la performance de la ligne de production, (puisque'il réduit l'effet de propagation des pannes sur le travail de toute la chaîne) • La capacité n'a pas de rôle significatif au cas où l'offre dépasse la demande.
<p>Yanbing.J, 2007</p>	<p>Utilizing Simulation To Anlayse One Production Process</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Le modèle de simulation est réalisé par Witness, - Le modèle est une ligne de production avec zone de stockage, - Adopter la loi exponentielle comme loi de distribution des pannes et du temps de réparations, - L'utilisation d'un nombre optimal de stations de travail permet de réduire le taux d'utilisation de la chaîne et ainsi maximiser le profit.
<p>Wijngaard,J. 1979</p>	<p>The effect of Interstage Buffer Storage on the output of tow Unreliable Production Units in series, with different Production Rates</p>	<ul style="list-style-type: none"> - L'article prouve que la capacité du stock tampon a beaucoup d'influence sur la performance de la ligne dans le cas où la différence net du taux de production décroît, - Une ligne déséquilibrée a besoin d'une zone de stockage, - Variation du taux moyen de production en fonction de la capacité K du stock, - La différence entre le taux net de production peut être la cause d'une variation : du temps de pannes, des taux de production des machines ou du temps de réparation.

<p>Sarker, B.H et James A. F, 1989</p>	<p>The performance of push and pull systems :a simulation and comparative study</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Les pannes sont générées par une loi exponentielle et normale, - Le temps d'opération suit une loi normale de moyenne 1 minute et un C_v qui varie entre 0 et 1, - Résultats : - L'augmentation du C_v réduit graduellement la performance de la ligne de production, - La capacité du stock tampon varie entre 0 et 2. Augmentation de 0 à 1 apporte 20 % de plus dans la performance de la ligne, (les machines sont sujettes aux défaillances aléatoires), - La performance de la ligne en fonction du C_v et en présence de la capacité du stock (effet d'interaction), - Voir l'effet de l'interaction de trois facteurs, à savoir : les défaillances, le stock et C_v.
<p>Albino, V et al. 1992</p>	<p>Maintenance Policies in just in time manufacturing lines</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La performance de la ligne de production dépend de la qualité de la politique de maintenance appliquée, - Le temps de processus suit une loi uniforme,
<p>Frederick, S.H et Kut, C. So. 1991</p>	<p>The effect of machine breakdowns and interstage storage on the performance of production line systems</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dans le même sens des idées, l'article prouve l'effet des défaillances sur le ralentissement de la production et vérifie l'impact de la capacité du ST sur l'amélioration du taux productif.

Le prochain chapitre porte sur la modélisation du système réel et la désignation des différentes étapes d'une étude de simulation.

CHAPITRE 4

MODÉLISATION

4.1. INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est, d'une part, de décrire le système réel à modéliser, et d'autre part, de détailler la méthodologie adoptée pour analyser les résultats obtenus par simulation de ce modèle. Les étapes de cette dernière procédure sont bien illustrées dans la figure 18.

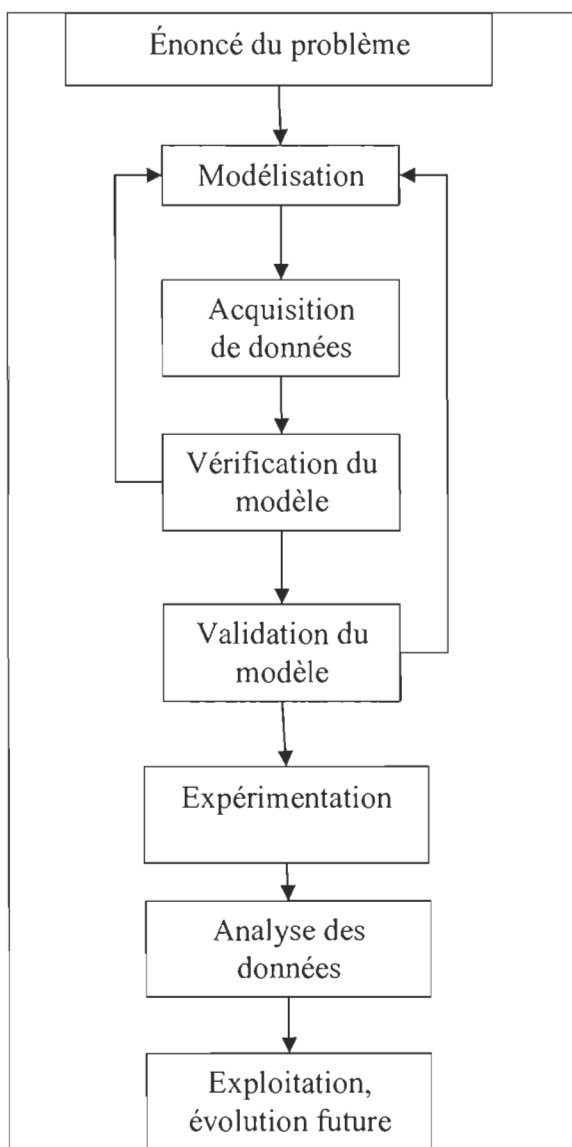


Figure 18 : Étapes d'une étude de simulation

Avant de commencer la modélisation, les définitions de certains concepts et expressions importants liés à la simulation sont définis, comme entre autres: la description du système réel, la définition de la modélisation et ses différentes étapes de base, la description du langage **SIMAN** utilisé, etc.

Pour terminer, ce chapitre explique comment les résultats de simulation ont été obtenus et ainsi analysés par le logiciel **MINITAB**, dans le but d'obtenir des conclusions pertinentes.

4.2. LA MODÉLISATION

La modélisation consiste à représenter un système réel dans le temps par un modèle de comportement artificiel dans le but de tirer des conclusions et des observations pertinentes à partir d'une animation. Donc, modéliser c'est traduire dans un langage formalisé le fonctionnement d'un **système** réel, tel que montré à la figure 19.

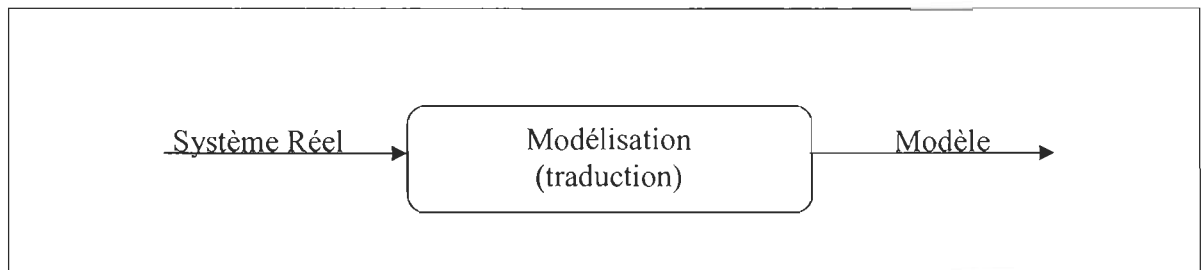


Figure 19 : La définition de la modélisation

Par la suite, les deux termes clés : le système et le modèle sont bien explicités.

Un **système** peut être soit naturel ou artificiel, ouvert ou fermé, stable ou non et peut être défini comme un ensemble d'entités qui interagissent dans un environnement bien défini dans le but d'atteindre un objectif commun, tout en respectant les relations fonctionnelles prises en considération. Une entité peut être soit : une machine, un opérateur, une information, une matière quelconque ou une combinaison de celle-ci. Ces objets sont les composants du système, et tout ce qui n'a pas de relation avec ces entités se nomme l'environnement (Millette, H.2008). Par exemple : prenons le cas d'une ligne de production qui est l'objet de ce travail. Ce système, dans une usine, a pour objectif de transformer la matière première en un produit fini. La matière première, les opérateurs, l'inventaire en

sont les composants. Tandis que l'application des politiques de maintenance sur les machines brisées en est la relation fonctionnelle.

Un **modèle** est, de manière générale, une représentation à comportement artificiel d'un système réel dans le temps mais de manière plus simple et compréhensive, dans le but de tirer des conclusions et des observations importantes qui aident à prendre une meilleure décision assurant la performance de la fonction objective à atteindre. En particulier, citons le modèle de simulation (Millette, H.2008).

Un **modèle de simulation** est un modèle formulé à travers un langage bien spécifié comme par exemple : **SLAM**, **SIMAN** de telle sorte qu'il puisse être utilisé efficacement pour des expériences de simulation. Pour ce type de modèle, les éléments de base sont présentés comme suit : (Draghici, G et al. 1998).

- Les composants sont définis auparavant,
- Les variables indépendantes : sont des variables déterminées indépendamment du fonctionnement du système,
- Les variables dépendantes : sont des valeurs qui dépendent du fonctionnement du modèle formulé, des interactions entre les différents réseaux,
- Les variables d'état : ces variables décrivent l'état du système (bris / marche),
- Les relations fonctionnelles qui décrivent les interactions entre les variables et les composants du modèle,
- Les générateurs d'aléas.

Après la compréhension de ces différents termes, il reste maintenant à entamer cette étude, à savoir : la modélisation d'une ligne de production avec stock intermédiaire entre les stations, en présence de trois types de politiques de maintenance : **ARP**, **BRP** et **MBRP**.

4.2.1. Le système réel

Le système réel consiste en **une ligne de production** formée par un nombre fini de stations qui sont séparées par des **stocks tampons** jouant le rôle d'inventaire entre les machines et permettant d'amortir la propagation de l'effet des défaillances et de la variation du temps d'opération sur l'ensemble du système (Chahdi, R.2007). En cas d'arrêt ou d'une

intervention préventive, la production s'interrompt et des politiques de maintenance s'enclenchent immédiatement pour résoudre les troubles de dysfonctionnement.

Par la suite, ces composants du système réel sont définis.

a) La ligne de production

En fait, la ligne de production est décomposée en plusieurs stations travaillant en série, chaque station est constituée d'un stock d'entrée, d'une machine et d'un stock de sortie. Le processus de fabrication consiste à transformer à l'aide des machines la matière première entrante en un produit fini « OUTPUT ». Le temps de fabrication sur les machines suit une loi de distribution prédéfinie et qui peut être propre à chacune des stations. Le stock de sortie contient des pièces finies qui attendent d'être consommées par la machine en aval; ainsi le stock de sortie de la machine (i) en amont appelé fournisseur représente en quelque sorte le stock d'entrée de la machine ($i+1$) en aval nommée consommateur.

(Tongambou, W. 1999);

b) Stock tampon

On désigne par stock tampon toute aire de stockage séparant deux unités de production. Il s'agit d'entité dédiée à réduire l'impact de la variabilité du flot dans la chaîne de production. Cette variabilité a pour origine les phénomènes aléatoires auxquels sont assujettis les composants du système. Parmi ces phénomènes, on note les pannes des machines, la cadence de production, etc. (Cheikhrouhou, N et Rémy, G. (2003); Chahdi, R. 2007)

Un stock tampon est caractérisé par : (Chahdi, R. 2007).

- Sa **capacité** : En pratique, il s'agit d'une grandeur finie qui quantifie le nombre maximale d'unités de produits semi-finis pouvant être stockés entre deux machines successives.
- Son **temps de transit** : C'est le temps de transfert des entités entre les deux machines. Souvent et dans la plupart des articles, ce temps est négligeable.
- Sa **fiabilité** : en effet, un stock tampon peut représenter certaines unités de production, comme entre autres: les convoyeurs, grue, chargeur, etc.

Le but de l'installation de ces zones de stockage est de découpler les machines et

d'améliorer la productivité du système en amortissant l'effet de défaillances sur l'ensemble du système. L'occurrence des pannes suit une loi de distribution. Pour faire face à ces bris, des politiques de maintenances sont mises en place. La figure 20 montre bien le système qui est modélisé par **ARENA**.

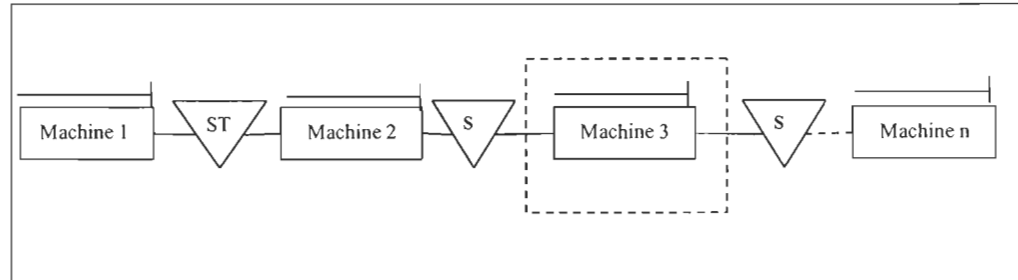


Figure 20 : Ligne de production constituée de n machines en séries avec stock tampon

* ST: Stock Tampon.

* Station (machine + stock de sortie).

4.2.2. Modèle de simulation

Comme mentionné ci-haut, l'objectif de cette modélisation est d'étudier la performance d'une ligne de production constituée par un nombre fini de stations séparées par des stocks tampons. Ce modèle est soumis à divers scénarios qui varient selon plusieurs facteurs. La partie suivante est structurée comme suit : détermination des différents composants du système, définition des différents facteurs expérimentaux et leurs choix de niveaux, définition des relations fonctionnelles et énoncé des hypothèses considérées, et pour finir, une présentation des différentes variables utilisées au cours de la simulation.

a) Les composants du modèle

Le modèle est formé par deux réseaux de simulation : un pour le système de production et un autre pour la génération des pannes et des moments d'application des maintenances préventives et correctives.

Les composants du premier réseau :

- * La matière première qui se transforme en un produit fini,
- * Les stations de travail qui contiennent les machines transformant la matière première en produit fini et les espaces pour les stocks de sortie,
- * Les ressources (les machines),

- * Un module **ASSIGN** est utilisé pour attribuer des variables aux entités passant dans le réseau.
- * Des modules **RECORD** sont installés pour enregistrer des informations importantes, comme entre autres: le temps de passage des commandes.

Les composants du deuxième réseau :

- * Les entités qui arrivent selon une loi de distribution et qui présentent les pannes assujetties aux postes de travail,
- * Les machines brisées,
- * Des modules **RECORD** sont installés pour enregistrer certaines données, comme entre autres: le nombre de pannes correctifs et préventifs.
- * Des modules **ASSIGN** sont utilisés pour attribuer des variables aux entités passant dans le réseau.

b) Les facteurs expérimentaux et leurs choix de niveaux

Les facteurs contrôlables se manifestent dans les termes suivants :

- * Nombre de stations travaillant en série,
- * La distribution du temps de production,
- * La loi de génération des pannes,
- * La capacité du stock tampon séparant les stations du travail,
- * Le type de la politique de maintenance appliquée.

Par la suite, le choix de différents niveaux associés à chaque facteur est expliqué.

Nombre de stations travaillant en série

Il s'agit du nombre de postes de travail qui se succèdent et par lesquels doivent passer la totalité des produits. Vu que cette variable est pertinente dans l'évaluation de la performance de la ligne de production, en outre, la plupart des études effectuées dans ce domaine comme par exemple (Tan, B. (1998) ; Kevin, B.H. (1991)) utilise un nombre fixe

de machines qui travaillent en séries. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'on a voulu choisir ce facteur comme variable.

Quant aux niveaux de cette variable, les choix sont les suivants :

- Niveau 1 : 2 stations en séries,
- Niveau 2 : 6 stations en séries,
- Niveau 3 : 10 stations en séries.

La distribution du temps de production

Le temps de production ou de fabrication pour un produit fini ou semi-fini représente le temps que la machine prend pour traiter le produit mis à sa disposition. Dans la plupart des études qui ont été réalisées, ce temps est aléatoire et suit une loi de distribution comme par exemple : une loi normale ou exponentielle. Citons l'exemple de (Lee, L.C et Seah, K.H.W. (1988); Albino, V et al.(1992); Sarker, B.R et al.(1989); Kevin, B. (1991)).

Dans le cadre de ce projet, une distribution normale avec une moyenne égale à une unité de temps (1 heure) et un coefficient de variation « CV » variable sont prises en considération.

Par la suite, les niveaux de ce facteur contrôlable sont les suivants :

- Niveau 1 : Norm (1,0.28), ($\frac{\mu}{\sigma} = 3.5$),
- Niveau 2 : Norm (1,0.22), ($\frac{\mu}{\sigma} = 4.5$),
- Niveau 3 : Norm (1,0.18). ($\frac{\mu}{\sigma} = 5.5$).

La loi de génération des pannes

Les défaillances relatives à chacune des machines sont générées par une loi de distribution Weibull. Le choix de cette distribution est expliqué à travers les lectures effectuées dans ce domaine de recherche (Yanbing, J. (2007); Tan, B. (1998); Fleurquin, G. (2006)).

Le choix de niveaux de ce facteur :

- Niveau 1 : Distribution Weibull de forme égale à 2 et une échelle de 400,
- Niveau 2 : Distribution Weibull de forme égale à 3.5 et une échelle de 400,
- Niveau 3 : Distribution Weibull de forme égale à 5 et une échelle de 400.

La capacité du stock tampons

La raison principale de choisir ce facteur comme variable, c'est qu'on a remarqué que ce type de ligne de production avec stock tampon est rarement utilisé par les autres auteurs qui ont effectué le même travail. Citons quelques références, comme entre autres: (Buzacott, J. (1971); Wijngaard, J. (1979); So, K.C. (1990))

Les niveaux attribués à cette variable sont comme suit :

- Niveau 1 : capacité 0,
- Niveau 2 : capacité 3,
- Niveau 3 : capacité 6.

Le type de stratégie de maintenance

Le choix des types de stratégies est limité sur les politiques les plus connues dans la littérature et qui sont fréquemment adoptées dans l'industrie, à savoir les stratégies : **ARP**, **BRP** et **MBRP**. (Thomas, W. (1996); Ait-Kadi, D et al. (2003); Abdul-Nour, G et al. (1995)).

Les niveaux affectés à ce facteur sont comme suit :

- Niveau 1 : Stratégie d'âge de remplacement « ARP »,
- Niveau 2 : Stratégie block de remplacement « BRP »,
- Niveau 3 : Stratégie block de remplacement modifié « MBRP ».

Pour terminer, le tableau 7 résume les facteurs expérimentaux et leurs choix de niveaux qui sont utilisés par la suite dans l'élaboration du plan d'expérience.

Tableau 7 : Les facteurs expérimentaux et leurs choix de niveaux

Les facteurs expérimentaux	Niveaux		
	2	6	10
1. Nombre de machines en séries	2	6	10
2. Le type de la stratégie de maintenance	ARP	BRP	MBRP
3. La capacité du stock tampon	0	3	6
4. La loi de génération des pannes	Weib(2,400)	Weib(3.5,400)	Weib(5,400)
5. La loi de distribution du temps de production	$\frac{\mu}{\sigma} = 3.5$	$\frac{\mu}{\sigma} = 4.5$	$\frac{\mu}{\sigma} = 5.5$

c) Les relations fonctionnelles et les caractéristiques du modèle

Cette partie est consacrée pour énoncer certaines hypothèses du travail et définir les caractéristiques du modèle de simulation, tout en expliquant les interactions ou les relations fonctionnelles existantes entre les variables et les composants du modèle.

- Le nombre de stations varie entre 2, 6 et 10,
- La capacité du stock intermédiaire varie entre 0, 3 et 6,
- Il n'y a pas de temps de pause ou supplémentaire dans le réseau de production,
- L'unité du temps est une heure,
- Une journée de travail vaut 8 heures,
- La simulation est réalisée sur 40 000 heures, avec 2 réplifications,
- Disponibilité des ressources pour la réparation des pannes,
- Le temps de transit pour les stocks tampons est nul,
- L'approvisionnement est infini pour la première station, c'est-à-dire qu'il y a une succession des commandes,
- Le temps de remplacement correctif T_C suit un log normal (3,1),
- Le temps de remplacement préventif T_P vaut 2 heures,
- Le temps de réparation minimale T_{rm} suit un log normal (1,0.2) pour les stratégies BRP et MBRP,

- Les paramètres de chaque stratégie, comme entre autres: le temps de remplacement pour ARP et BRP, et le seuil de remplacement pour la stratégie MBRP sont fixés par l'outil d'optimisation **OPTQUEST**,
- La quantité produite par la ligne de production est la fonction objective à optimiser,
- Pour la politique **MBRP**, le temps pris pour vérifier si le temps de remplacement T dépasse ou non le seuil de remplacement est considéré négligeable,
- Le temps de production des machines est tiré d'une distribution normale dont la moyenne est déterminée et un coefficient de variation variant entre 0.28, 0.22 et 0.18,
- Les défaillances sont distribuées selon la loi de Weibull avec une échelle égale à 400 et un facteur de forme variant entre 2, 3.5 et 5,
- La détection des pannes se fait automatiquement.

d) Les mesures de performance

Les mesures de performance sont aussi dites variables dépendantes, c'est-à-dire dont la variable dépend du fonctionnement du système modelé, des interactions, etc. Citons parmi ces mesures les plus importantes : le temps de passage, en cours de production (**WIP** : WORK IN PROCESS), le taux d'utilisation des ressources, la quantité produite à la fin du cycle de fabrication, etc.

- **Temps de passage**

Ce temps correspond au temps écoulé entre le lancement de la commande et son arrivée au stock de sortie de la dernière station. Cette mesure est utilisée par la suite pour valider le réseau de production. En outre, dans la plupart des études de simulation, cette variable n'est pas utilisée comme mesure de performance. Dans le même ordre d'idées, certains articles ont utilisé ce temps de passage pour le calcul du temps total et ainsi déterminer la disponibilité des ressources adoptées, à savoir : les machines de fabrication. (Tongambou, G.1999; Fleurquin, G et al. (2006)). Dans la partie de validation des réseaux, le temps de passage est exprimé en termes de moyennes de deux répliques.

- **Le niveau d'en cours**

Cette mesure appelée **WIP**, présente dans le modèle étudié : le stock intermédiaire existant sur la ligne de production à un instant donné. Cette variable renvoie l'information sur l'état des stocks présents dans le système. Certains chercheurs ont adopté cette variable comme une mesure de performance, entre autres : (Lee, L.C et Seah, K.H.W. (1988)).

- **Le taux d'utilisation des ressources**

Cette mesure fournit une indication sur le taux d'occupation des stations de la ligne de production. Par exemple, dans un environnement idéal où il n'y a ni arrêt, ni panne : le taux d'utilisation est 100 %. Une mesure pareille est utilisée aussi pour valider le fonctionnement du réseau de simulation au niveau de la production. Dans la partie de validation, la valeur de cette mesure est prise en termes de moyennes de deux répliques.

- **La quantité produite ou complétée**

Cette mesure présente la sortie du modèle. Elle est utile par la suite dans la partie analyse des résultats de simulation. En fait, elle permet d'évaluer le nombre de commandes complétées par rapport aux commandes lancées sur une durée de simulation bien définie. Cette variable permet de savoir s'il y a un retard au niveau de la commande et par conséquent déduire si le modèle fonctionne correctement ou non. Dans certains travaux, comme par exemple (Abdul-Nour, G et al, 1995), les auteurs ont utilisé cette variable comme une mesure de performance pour évaluer la performance d'une ligne de production **JAT**.

4.2.3. Les Hypothèses

Les hypothèses qui sont considérées dans la phase conceptuelle du modèle se résument dans les points suivants :

- L'approvisionnement est infini pour la première machine,
- Les défaillances des machines prennent lieu soit avant ou après la phase de production,
- Les ressources (machines et opérateurs) sont disponibles pour la production et la maintenance,

- Le rythme de la ligne de production suit celui de la première machine, on parle de succession des commandes,
- La durée de simulation est de 40 000 heures,
- Le nombre de répliques est égal à 2.

4.2.4. Le diagramme de processus du modèle de simulation

Avant d'entamer la conception du réseau via ARENA, il est primordial de dresser un diagramme de processus, visant à expliquer le fonctionnement du système réel. Toutefois, comme c'est déjà mentionné dans le paragraphe 4.1, le réseau de simulation est composé de deux branches : une pour la production et l'autre pour la politique qui est appliquée en cas de défaillance ou en cas d'intervention préventive. Pour ce faire, deux diagrammes de processus sont tracés. La partie suivante illustre la configuration de 2 machines en séries avec un stock tampon à capacité variable, en présence de la stratégie **ARP**.

La ligne de production formée de deux machines travaillant en séries, et d'un stock tampon fonctionne comme suit. En fait, la zone de stockage reliant les deux postes de travail sert à transporter les produit semi-finis de la première à la deuxième machine et permettant une accumulation des entités selon la capacité prédéfinie dans les éléments. Une telle ligne de production autorise l'arrêt temporaire d'une machine sans entraîner l'arrêt de toute la ligne. Les postes disposés en amont de la machine brisée poursuivent la production en accroissant le stock tampon en amont de la machine défaillante, tandis que les machines en aval peuvent fonctionner en étant alimentées par le stock en aval de la machine en bris. En cas de panne ou d'intervention préventive, une politique de maintenance (ARP, BRP et MBRP) est appliquée.

La figure 21 présente le diagramme **I** relatif au réseau de la production, alors que la figure 22 indique le diagramme **II** lié au réseau de la maintenance.

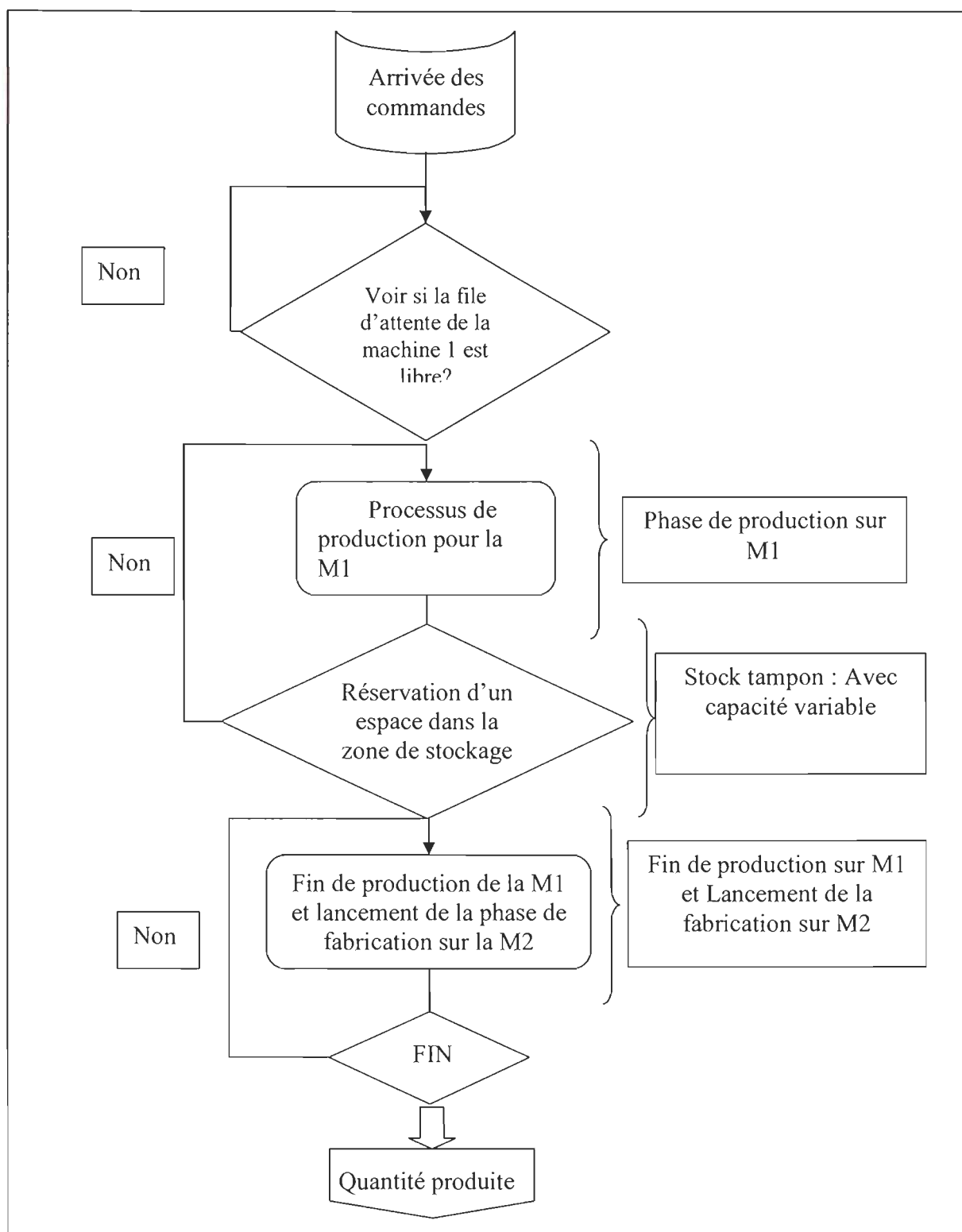


Figure 21 : Diagramme I pour la phase de production de 2 machines en séries avec stock tampon

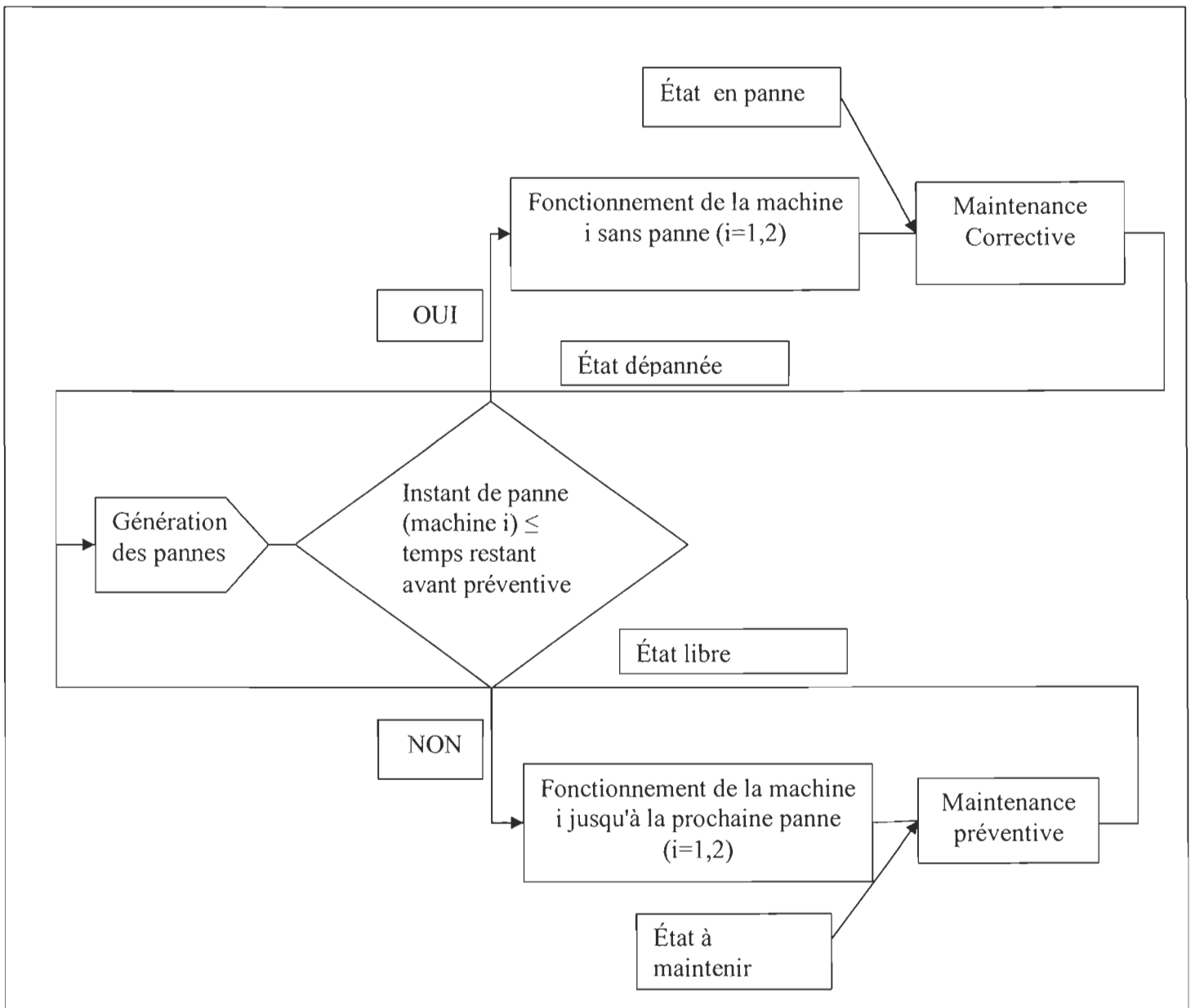


Figure 22 : Diagramme II : La logique du modèle de simulation de la stratégie de type âge

4.2.5. Le réseau d'ARENA-SIMAN

Pour ce cas d'étude, un total de neuf modèles de simulation est conçu. Pour chaque politique de maintenance, trois réseaux sont construits selon le nombre de machines pris en considération (2/6/10). À l'intérieur de ces modèles, tous les autres facteurs expérimentaux varient.

Ce paragraphe présente en détails la configuration correspondante à deux machines en séries avec stock tampon, en présence de la stratégie **ARP** comme une politique de maintenance. Quant à ce réseau, les facteurs expérimentaux sont les suivants :

- Nombre de station : 2,
- La capacité du stock tampon : 3,
- La stratégie de maintenance : **ARP**,
- Le temps de remplacement « Âge de remp » $T=436$ heures, est fixé par optimisation,
- La période de fonctionnement « période de fonct » : 40 000 heures,
- Les défaillances suivent la loi Weibull (400,2),
- Temps de remplacement correctif : Lognormal(3,1),
- Temps de remplacement préventif : 2,
- Temps de fabrication suit une loi normale ($\mu=1$, $\sigma=0.28$).

La figure 23 illustre la version miniature du réseau décrit précédemment. Le premier est celui de la phase de production (diagramme I), tandis que le deuxième est pour la maintenance (diagramme II). Le reste des réseaux ARENA – SIMAN se retrouve dans l'annexe I.

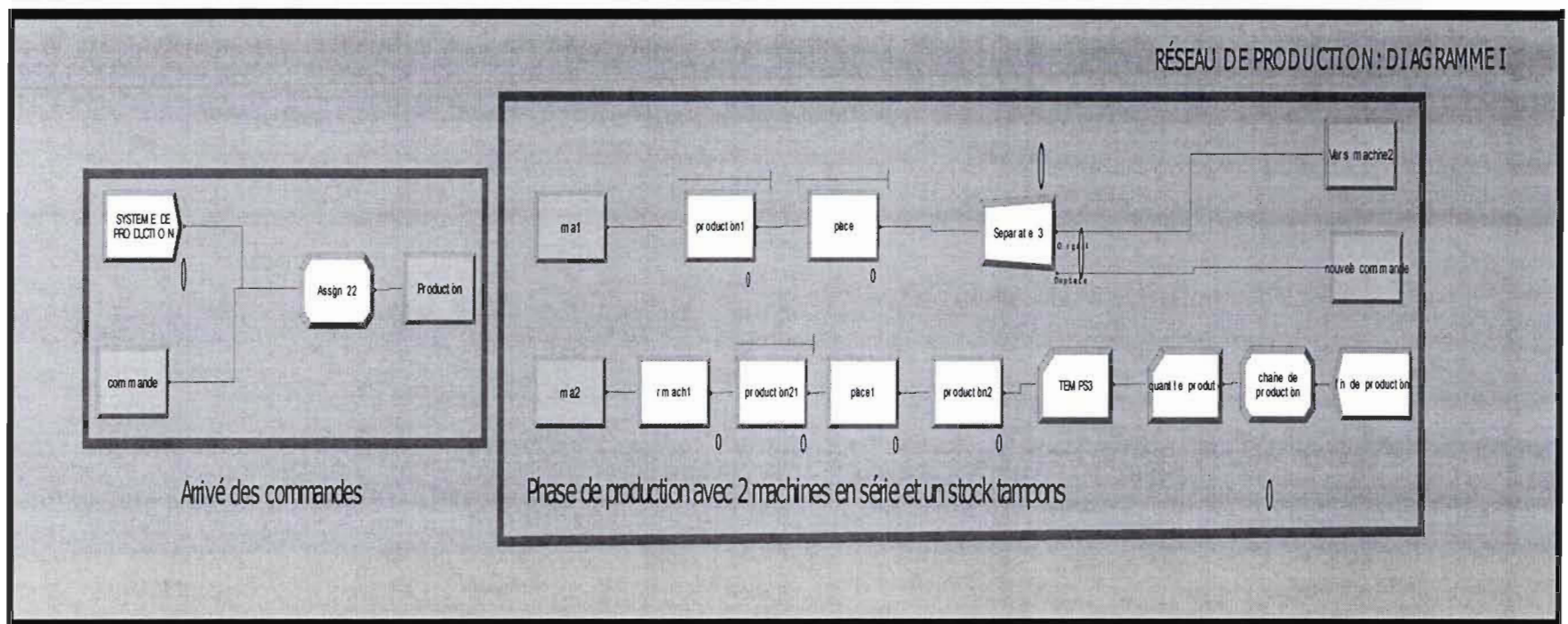


Figure 23(a) : Réseau de production

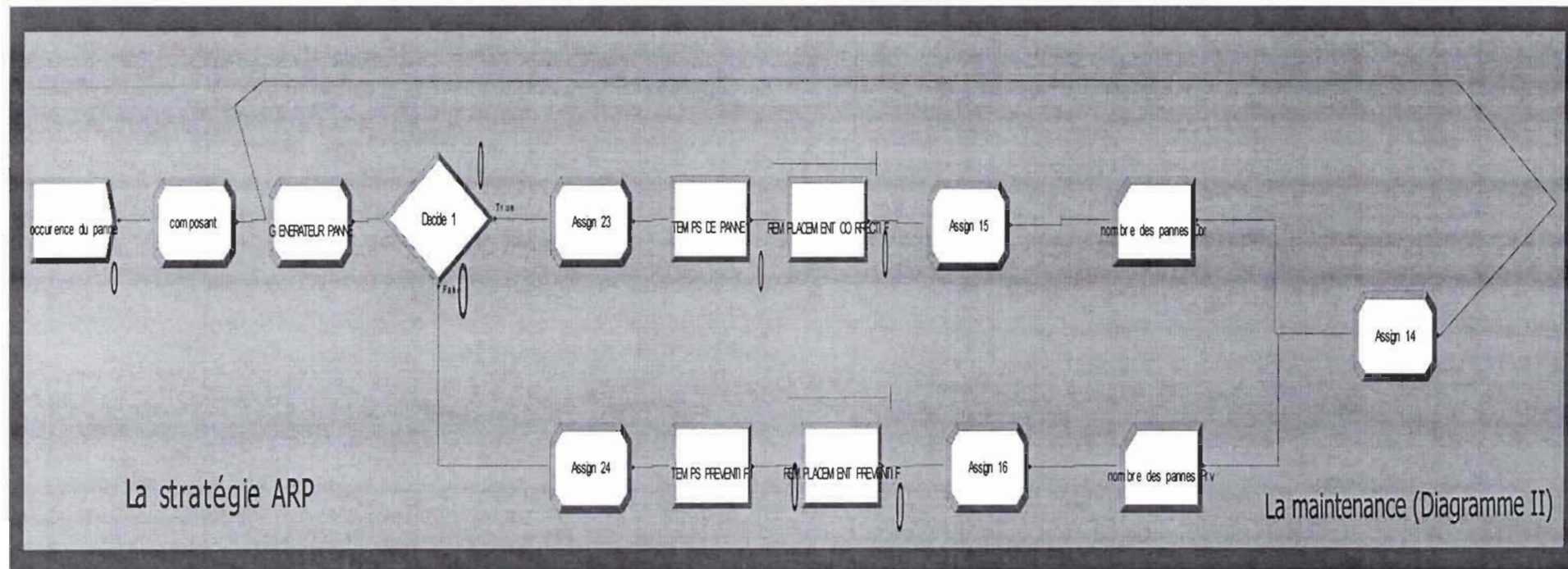


Figure 23(b) : Réseau pour la phase de maintenance

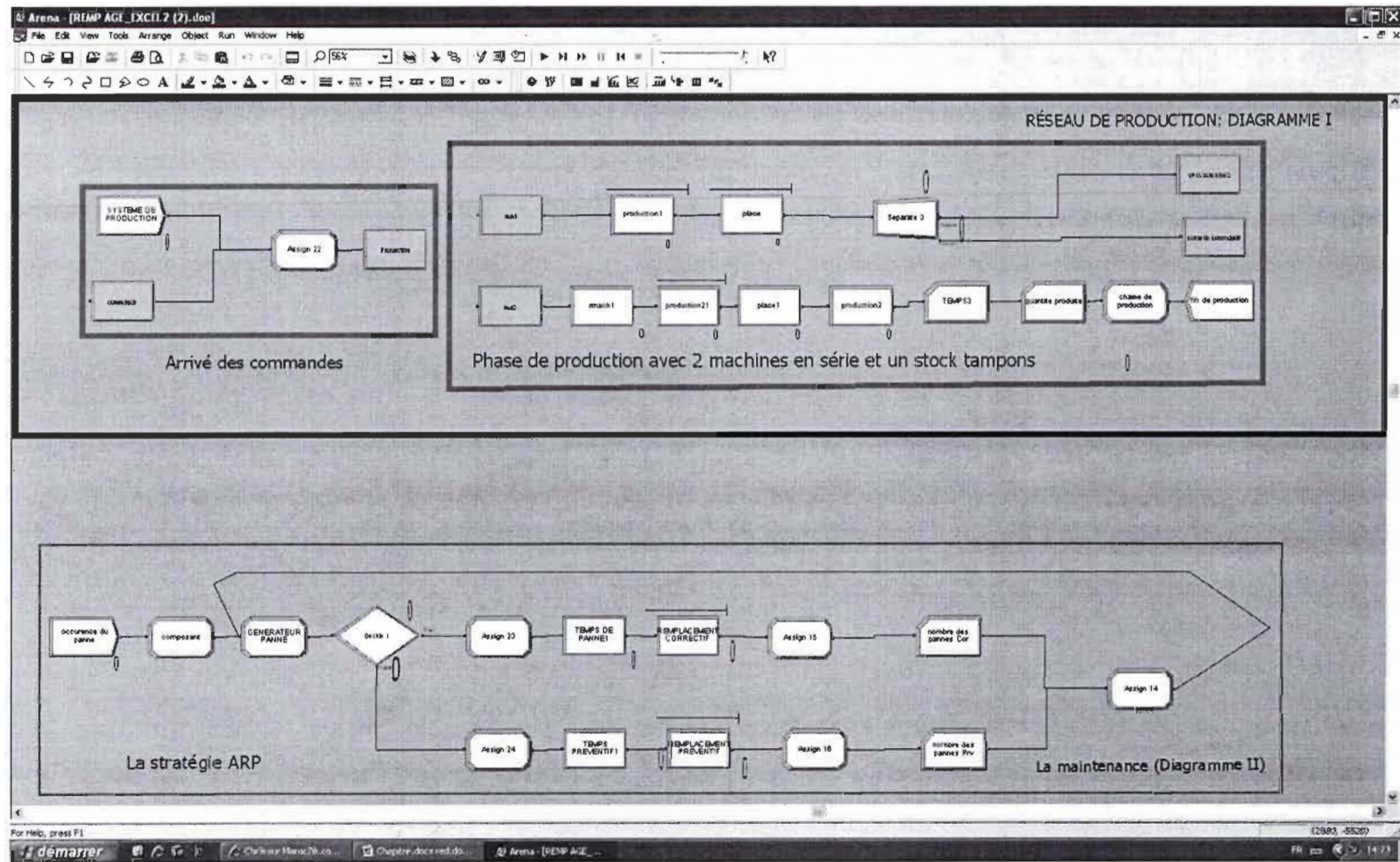


Figure 24 : Réseau d'une ligne de production composée par 2 machines et un stock tampon en appliquant la stratégie ARP

La figure 24 montre le réseau complet pour le système modélisé.

Pour mieux comprendre toutes les parties constituant le réseau de simulation, les termes suivants sont définis : les entités, les variables, les ressources, etc. qui y sont liés.

- **Les entités**

En total, il y a trois types d'entités qui circulent dans le réseau : une qui présente l'arrivée des commandes dans le premier réseau de production et les deux autres identifient les pannes relatives à chacune des machines, dans le deuxième réseau de maintenance.

- **Les variables**

Il y a deux catégories de variables : les variables globales et les attributs.

Variables Globales :

- **Période de fonct** : Représente la durée de simulation,
- **Coût total moyen, Coût total moyen unitaire, coût de remplacement préventif u, coût de remplacement correctif u** : Représente les coûts unitaire et total associés à chaque tâche de maintenance corrective et préventive.
- **Âge de remp** : Représente le temps de remplacement préventif,
- **Type** : Identifie le type d'entité lié à la panne de la machine, par exemple si Type=1 alors Entity. Type =1 et la panne est associée à la machine 1. (cette variable est exploitée dans le deuxième réseau),
- **Quantité** : Représente la commande complétée à la fin de la période de simulation,
- **Prior1, Prior2 et Prior3** : Représente la priorité d'appliquer la maintenance soit corrective ou préventive sur la machine sans interrompre la production,
- **Temps de fabrication sur les machines** : Suit la loi normale de moyenne une unité du temps et un coefficient de variation C_v variable,
- **Temps de production** : Présente le début de lancement de la commande et elle est associé à **TNOW**, on l'a utilisé pour mesurer le temps de passage des entités dans le réseau de production,
- **Instant de panne** : Une variable qui représente l'instant de panne associé à chaque machine, et elle suit la loi de Weibull,
- **Temps de remplacement correctif** : Représente le temps mis pour faire la réparation de la défaillance **Lognormal(3,1)**,

- **Temps de remplacement préventif** : Représente le temps mis pour maintenir la machine,
- **Temps de vérification** : Représente le temps mis pour voir si le temps restant à la prochaine maintenance préventive dépasse ou non le seuil indiqué.

Attribut :

Entity.type : Identifie le type d'entité qui se déplace,

Entity.picture : Sert à associer à chaque entité une image pour les faire se différencier des autres pendant l'animation,

- **Les Ressources**

Les ressources utilisées sont les deux machines : M1 et M2, et le stock tampon « stock » de capacité 3. Pour les machines, elles sont réunies dans un **set**.

- **Les processus et les différents blocs de modélisation**

Réseau I de production :

1. Arrivée et identification des commandes

Les modules **CREATE**, **station** et **route** permettent respectivement la création et la succession des commandes. Le temps d'arrivée de l'entité est sauvegardé dans l'attribut **TNOW**,

Une fois que les entités sont lancées, elles passent par les processus relatifs aux deux phases de productions effectuées par les deux machines et par la zone de stockage. Afin d'enregistrer les mesures de performances, à savoir : le temps de passage des entités et la quantité produite à la fin de la production, deux modules **RECORD** sont utilisés avec deux fonctions de types : **time Interval (temps de passage)** et **Count (la quantité produite)**.

2. La phase de production et la zone de stockage

Pour le cas actuel, la phase de production est réalisée par deux machines. Pour ce faire, deux modules **PROCESS** sont mis sur pieds, dont les caractéristiques sont les suivantes :

- **Premier Processus**
 - Type : Seize Delay Release,
 - Un temps normal de fabrication de moyenne 1 heure et CV,
 - Une ressource : M1, machine 1,

- **Deuxième Processus**

- Type : Seize Delay Release,
- Un temps normal de fabrication de moyenne 1 heure et CV,
- Une ressource : M2, machine 2,

Pour l'aire de stockage, on a mis en place un module **PROCESS** ayant les critères suivants :

- Type : Seize Delay Release,
- Ressource : Stock,
- Capacité de la ressource : 3 (fichier ressources)

Note :

- **Les ressources Machines sont stockées dans un fichier SET.**
- **Le type de file d'attente est FIFO.**

3. Fin de la simulation du réseau I

À la fin de la production, le nombre de produits finis est décrémenté dans un module **ASSIGN** et enregistré dans une variable « **Quantité** », telle que : **Quantité = NC (quantité produite)**. Le réseau de simulation se termine par un module **DISPOSE**.

Réseau II de la maintenance :

Dans cette partie, le fonctionnement du deuxième réseau de maintenance est expliqué, à savoir : La création des entités et l'occurrence des pannes, le déroulement du processus de maintenance correctif et préventif et les résultats retenus à la fin de la simulation.

1. La création des entités et l'occurrence des pannes

Comme il a déjà été mentionné, le cas traité correspond à une ligne de production formée par deux machines travaillant en séries. La création des entités se fait par un bloc **CREATE** dont les caractéristiques sont les suivantes : **Entity per Arrival** = 2 (deux machines); **Time between Arrivals** : constant et égal à 0.

Une fois créée, l'entité passe par un autre module **ASSIGN** où des nouveaux attributs et variables lui sont assignés. Citons ici la variable **Type = Type + 1** : cette dernière s'incrémente de un à chaque fois qu'une panne a lieu. En outre, des attributs comme Entity. Type (**Entity. Type = Type**) et Entity. Picture (**Entity. Type = Type**) sont affectés aux entités, afin de les différencier en cours d'animation.

Exemple :

- Si la première entité est créée, alors la variable **Type** prendra la valeur 1 et la machine 1 est maintenue soit préventivement ou correctivement,
- Pour les attributs, **Entity. Type** et **Entity.picture** retiennent la valeur 1.

2. Le déroulement du processus de maintenance (Correctif/Préventif)

Avant d'entamer les phases de maintenance, les entités repassent par un autre module **ASSIGN** dans le but de générer des **instants de pannes** relatives à chaque poste de travail, chaque type d'entité retient une valeur tirée d'une distribution Weibull. En outre, une variable de dimension 1 (1D) nommée **TMP (Temps de Maintenance Préventif)** est affectée à chaque **type d'entité**, telle que :

$$\text{TMP (Entity. Type)} = \text{TNOW} + \text{Âge de remp (Entity. Type)}.$$

Pour décider quoi faire pour la maintenance à appliquer, un module **DECIDE** est utilisé. Ce dernier est de type **2 way by condition** et sert à comparer les deux termes, à savoir: **Instant de panne (Entity. Type)** et **TMP (Entity. Type)**.

Par exemple :

Si l'entité est de **Type 1**, donc « **Entity. Type** » retient la valeur 1 et par la suite, l'expression ou la condition de vérification s'écrit comme suit :

En cas de maintenance correctif : **Instant de panne (1) + TNOW < TMP (1)**,

En cas de maintenance préventif : **Instant de panne (1) + TNOW > TMP (1)**,

Une fois que la panne est déclenchée, la priorité est donnée à la phase de maintenance sur la production, toute en respectant l'hypothèse annonçant que la fabrication ne doit pas être interrompue. Pour ce faire, trois variables **Prior 1, 2 et 3** dans les modules **ASSIGN** sont créées. En fait, dans ce raisonnement, la priorité est donnée aux entités ayant la plus grande valeur affectée. C'est d'ailleurs pour cette raison que dans le fichier **QUEUE**, lequel est associé aux processus de maintenance correctif, préventif et à la phase de vérification, l'option **HAV (Highest Attribute Value)** est choisie.

Pour réaliser la maintenance corrective ou préventive, deux blocs **PROCESS** sont mis en place. Les caractéristiques de ces deux modules sont les suivantes :

Pour la maintenance Correctif :

- Type : Seize Delay Release,

- Ressources : Set : Machine i ($i=1, 2$), le compteur i dépend de la valeur attribuée au type d'entité.
- Priority : High,
- Temps de maintenance Corrective : Log Normal (3,1),

Pour la maintenance Préventif :

- Type : Seize Delay Release,
- Ressources : Set : Machine i ($i=1, 2$), le compteur i dépend de la valeur attribuée au type d'entité.
- Priority : High,
- Temps de maintenance Préventive : 2,

Pour finir, des modules **ASSIGN** et **RECORD** sont conçus respectivement pour collecter et enregistrer les informations servant à valider le fonctionnement du réseau, comme entre autres: les coûts moyens unitaires totaux, le temps d'arrêt de la production, le nombre de maintenances correctives et préventives, ces dernières sont stockées dans des variables (1D) nommées respectivement : **Nb correctif** et **Nb préventif**.

3. La fin de la simulation

Contrairement au premier réseau de production, celui de la maintenance est construit de la manière qu'il est présenté sous forme d'un cycle fermé, c'est-à-dire qu'il ne possède pas un module **DISPOSE** pour achever la simulation.

Le fonctionnement du cas actuel de deux machines travaillant en série avec stock intermédiaire, en présence de la stratégie **ARP** comme politique de maintenance, est expliqué par la suite, dans le but de mieux comprendre la manière dont le réseau ci-dessus fonctionne.

En fait, ce modèle de simulation travaille de la façon suivante :

- La phase de production se lance et se poursuit par les deux machines jusqu'à l'interruption soit totale ou partielle de la fabrication causée par une défaillance de l'un des postes de travail. Deux cas provoquent le blocage total de la ligne de production : le premier est quand la machine 2 est affectée, tandis que le deuxième a lieu quand la maintenance préventive sur les deux machines 1 et 2 est appliquée. Toutefois, l'interruption partielle est la conséquence de la combinaison suivante : défaillance de la machine 1 et poursuite de la production sur la machine 2. Cette dernière situation est expliquée par la présence d'un

stock tampon de capacité finie entre les deux stations ayant pour rôle d'amortir la propagation de l'effet de défaillances sur l'ensemble du système. Par conséquent, le stock tampons est considéré comme une valeur ajoutée à la ligne de production.

Modification apportée aux autres réseaux de simulation pour les stratégies BRP et MBRP :

Concernant la phase de production, le même réseau de simulation pour les deux politiques de maintenance **BRP** et **MBRP** est réutilisé. La modification est retenue au niveau du deuxième réseau de maintenance.

Les changements apportés se manifestent comme suit :

Pour la stratégie BRP :

- La variable **TMP** de type (1D) s'écrit sous la forme suivante :

$$\text{TMP} = (\text{AINT}(\text{TNOW}/\text{Période de Remp}(\text{Entity.type})) + 1) * \text{Période de Remp}(\text{Entity.type})$$
- La variable **Période de Remp** est fixée par l'outil **OPTQUEST**,
- Au niveau du module **DECIDE**, se fait la comparaison de deux variables (1D):
Instant de panne et **TMP**, afin de choisir le type de maintenance à appliquer.
- Des réparations minimales sont effectuées en cas de défaillances.

Pour la stratégie MBRP :

- La variable **TMP** retient la même expression que la stratégie **BRP**,
- Utilisation d'une nouvelle variable **AGECR** qui renvoie le temps restant à la prochaine maintenance préventive, telle que :

$$\text{AGECR} = (1 - \text{Instant de panne}(\text{Entity.type}) / \text{TMP}(\text{Entity.type})) * \text{TMP}(\text{Entity.type})$$
- Ajout d'un paramètre « **SEUIL** » qui est fixé par l'outil **OPTQUEST**,
- Des réparations minimales sont effectuées en cas de défaillances.
- Ajout d'un petit réseau composé par les blocs suivants :

DECIDE : Comparaison entre les deux termes : **SEUIL** et **AGECR**, dans le but de vérifier si une maintenance préventive est indispensable ou non. À signaler que le temps mis pour la vérification est considéré comme nul.

- Si **AGECR** < **SEUIL** : Pas de maintenance préventive,
- Si **AGECR** > **SEUIL** : Application de la maintenance préventive.

PROCESS : ce module est de type « **SEIZE DELAY RELEASE** » et utilise le set **machine** comme ressource avec **Priority High**.

ASSIGN : Pour attribuer le temps de la prochaine maintenance préventive à chaque entité passant dans le réseau.

RECORD : Pour enregistrer les cas retenus.

Note :

Les variables (1D) sont écrites sous forme vectorielles dont la dimension du vecteur dépend du nombre d'entité qui circulent dans le réseau **II** et qui est équivalent aux nombres de machines.

Les énoncés

Le modèle de simulation est complété par une série d'énoncés qui se présentent comme suit :

Les énoncés d'initialisation : Pour l'outil **ARENA**, les valeurs initiales de certaines variables (globale en particulier) prennent automatiquement la valeur zéro, sinon des valeurs fixes leurs sont attribuées par l'utilisateur. Par exemple :

- **Période de fonct** : 40 000 heures,
- **TMP** : Valeur initiale est 0,
- **Âge de Remp** : 436 heures,
- **Quantité** : Valeur initiale 0,
- **Coût de remplacement préventif** : 100,
- **Coût de remplacement correctif** : 500.

Valeur optimale fixée par **OPTQUEST** :

Avant de déterminer les valeurs optimales via **OPTQUEST** assujetties à chaque stratégie de maintenance, à savoir :

- **T*** : L'âge de Remplacement pour la stratégie **ARP**,
- **T*** : La période de Remplacement pour la stratégie **BRP**,
- **(T*, S*)** : La période et le seuil de remplacement pour la stratégie **MBRP**,

Une vue d'ensemble sur ce moyen d'optimisation est fournie. En fait, le logiciel **ARENA** comprend un module d'optimisation appelé **OPTQUEST**. Ce dernier compte parmi les outils les plus robustes dans le monde d'optimisation, vu qu'il comprend des techniques d'échantillonnage et de contrôle d'erreur avancée pour trouver les meilleures réponses

rapidement, et intègre des algorithmes de pointe basés sur la recherche tabou, recherche de points, programmation en nombre entier et les réseaux neuronaux.(site1)

Concernant ces avantages, citons-en quelques-uns :

- Séparation efficace entre la simulation du modèle et la procédure d'optimisation,
- Analyse des résultats d'expériences de simulation et optimisation des paramètres critiques de fonctionnement,
- Facile à utiliser, il permet de définir différentes entrées du système (contrôles et les contraintes) ainsi que le résultat souhaité ou la fonction objective à retenir.

Par la suite, toutes les variables entrantes, les contraintes et la fonction objective à tenir en compte sont présentées. L'optimisation est réalisée sur le cas de deux machines en série avec 0 inventaire, avec une loi normale de $\mu=1$ et $\sigma=0.28$ générant le temps de production et une loi Weibull (2,400) pour la distribution des pannes en présence de trois types de maintenance : **ARP**, **BRP** et **MBRP**.

Le tableau 8 illustre les différents paramètres d'OPTQUEST, à signaler que les variables optimales désignées dans le tableau 9 sont obtenues pour 100 simulations et 2 répliques.

Tableau 8 : Les différents paramètres d'OPTQUEST
(Réponse, contrainte et contrôle)

	ARP	BRP	MBRP
Réponse	Max (quantité produite)	Max (quantité produite)	Max (quantité produite)
Les contraintes	Âge de Remp [1] = Âge de Remp [2]	Période de Remp [1] = Période de Remp [2]	Période de Remp [1] = Période de Remp [2] & Seuil [1] = Seuil [2]
Les contrôles	$0 \leq \text{Âge de Remp [1]} \leq 1000$ $0 \leq \text{Âge de Remp [2]} \leq 1000$	$0 \leq \text{Période de Remp [1]} \leq 1000$ $0 \leq \text{Période de Remp [2]} \leq 1000$	$0 \leq \text{Période de Remp [1]} \leq 1000$ $0 \leq \text{Période de Remp [2]} \leq 1000$ & $0 \leq \text{Seuil [1], Seuil [2]} \leq 1000$

Tableau 9 : Les valeurs optimales associées à chaque stratégie de maintenance

Les stratégies	Les paramètres optimaux
ARP	$T^* = 436$ heures
BRP	$T^* = 936$ heures
MBRP	$(T^*, S^*) = (983, 989)$

*** : Valeur optimale.**

Les fichiers d'optimisation sont insérés dans l'annexe II.

4.2.6. La validation du modèle de simulation

La validation du modèle consiste à vérifier si celui-ci constitue une vraie présentation du système réel. Elle peut se faire soit par : une étude comparative entre l'approche analytique et la simulation ou bien par la vérification de certains scénarios pour visualiser et vérifier certaines mesures de performance, entre autres: le temps de passage et le taux d'utilisation des ressources. Le système modelé est bel et bien valide et fonctionne correctement. Les détails des étapes de la validation sont mentionnés dans l'annexe II.

Détermination du Régime Permanent :

Pour évaluer le comportement d'un système via un modèle de simulation, il est très important de s'assurer que les résultats de la mesure de performance sont obtenus dans des conditions normales d'opération, ou dans un autre sens hors la période transitoire.

Pour ce faire, la réponse à cette question est primordiale :

Quand est-ce que le système modelé entre en régime permanent?

Dans les lignes qui suivent, la méthode suivie pour répondre à cette interrogation est détaillée :

- **Choix de l'indicateur : (variable dépendante)**

Prenons le **temps de passage** des entités dans le **réseau I**.

- **Expérience pilote :**

Les expériences sont réalisées sur un modèle formé par 2 machines en séries avec un stock tampon de capacité 3 et en présence de la politique **ARP**, ceci en sachant que le temps opératoire suit une loi normale (1,0.28) et que les pannes sont distribuées selon la loi de weibull(2,400).

Le tableau 10 présente le temps de simulation considéré et le nombre de source (Nombre d'itérations) à effectuer.

Tableau 10 : Expérience Pilote

Nombre de source	3	5	7	10	15
Durée 1000 heures	3.8956	3.9027	3.9816	3.8812	3.9726
Durée 1500 heures	3.9431	3.9163	3.9979	3.9410	3.9998

*Le temps de passage est la valeur moyenne du nombre de sources.

- **Test de STUDENT**

Ce type de test vérifie si le modèle de simulation entre en régime permanent à partir de 1000 heures, étant certain qu'il l'est à 1500 heures. Les hypothèses sont les suivantes :

H_0 : Le régime permanent est bel et bien atteint à 1000 heures,

H_1 : Ce n'est pas le cas.

Commençons par calculer la moyenne et l'écart type des deux échantillons.

La valeur moyenne de X_1 : 3.9267,

La valeur moyenne de X_2 : 3.9596,

S_1 : 0.046,

S_2 : 0.0374

$$t_{pratique} = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (1)$$

Où

$$n_1 = 5$$

$$n_2 = 5$$

$$t_{pratique} = 1.22 \text{ minutes}$$

Le degré de liberté vaut : $n_1 + n_2 - 2 = 8$

D'après la table STUDENT avec $\alpha = 0.05$: on a : $t_{théorique} = 1,86 \text{ minutes}$

Ce qui donne que : $t_{pratique} < t_{théorique}$

Et par la suite, l'hypothèse H_0 est vraie.

Après 1000 heures de simulation, le régime permanent est bel et bien atteint, et tous les résultats qui sont pris par la suite, par exemple dans ce cas d'étude après 40 000 heures, sont dans des conditions normales d'opération.

4.3. LE MODÈLE MINITAB POUR LE TRAITEMENT DES RÉSULTATS

Pour connaître les effets des différents facteurs expérimentaux et de leurs interactions sur la performance de la ligne de production avec stock intermédiaire, un traitement statistique des résultats obtenus de divers scénarios de simulations est mis en œuvre. Ceci est réalisé grâce au logiciel **MINITAB**.

Les facteurs et les niveaux du plan d'expérience sont déjà fixés au départ, pour la réponse : c'est le nombre des unités produites à la fin de la production.

La partie suivante explique dans un premier temps le design expérimental mis sur pied, et dans un second temps, elle définit le modèle **MINITAB** utilisé.

4.3.1. Le design expérimental

Un plan factoriel complet est mis au point comme un plan d'expérience explicitant tous les facteurs, leurs niveaux et les différents scénarios à réaliser. La figure 25 donne une idée sur le contenu de la grille du plan factoriel complet.

Ordre standard, ordre d'essai et numéro d'essai			Les facteurs expérimentaux					Réponse
Ordestd	OrdreEssai	TypePt	S	D	I	M	P	Q

Figure 25 : La structure du plan factoriel complet

En fait, en multipliant les niveaux de divers facteurs et en tenant compte de deux réplifications par cellule, on déduit qu'un total de **486** expériences est nécessaire pour ce projet.

Pour faciliter le travail, une abréviation est associée à chaque facteur expérimental et à la mesure de performance. La légende attribuée est présentée comme suit :

S : Type de stratégies de maintenances,

D : Loi de distribution des pannes,

I : La capacité du stock tampon,

M : Nombre de machines travaillant en séries,

P : Rapport entre la moyenne et l'écart type pour la loi de distribution du temps de production.

Q : La quantité produite.

L'entrée et la structuration des données :

Après la création du plan factoriel complet, chaque scénario est associé à sa mesure de performance qui est dans ce cas la quantité produite à la fin de la production. Tout le plan factoriel est présenté dans le prochain chapitre d'analyse et interprétation des résultats.

L'analyse des données :

Cette étape consiste à lancer une analyse de variance **ANOVA** équilibrée, en faisant rentrer le modèle pris en considération, les facteurs aléatoires et la réponse ou la mesure de performance.

Le modèle

Le modèle comporte des facteurs, des interactions doubles, triples et quadruples. Toutefois, la partie analyse se limite sur les effets des facteurs et des interactions doubles vu qu'ils sont interprétables.

S D S*D I S*I D*I S*D*I 'M' 'M'*S 'M'*D 'M'*S*D 'M'*I 'M'*S*I 'M'*D*I 'M'*S*D*I P
P*S P*D P*S*D P*I P*S*I P*D*I P*S*D*I P*M' P*M'*S P*M'*D P*M'*S*D P*M'*I
P*M'*S*I P*M'*D*I

Les facteurs aléatoires:

D/ P

Réponse:

Q

Pour finir, ce chapitre a décrit et expliqué les modèles de simulations utilisés pour l'étude du comportement du système réel faisant l'objet de cette étude, ainsi que la méthode utilisée pour le traitement statistique des résultats.

Le chapitre qui vient par la suite présente les résultats obtenus, leurs interprétations ainsi qu'un sommaire comparatif avec d'autres recherches pertinentes.

CHAPITRE 5

DESCRIPTION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

5.1. INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats obtenus après le traitement statistique. Pour finir, un sommaire comparatif est fait avec d'autres recherches similaires, afin d'appuyer les résultats trouvés.

5.2. RÉSULTATS VIA MINITAB

Après la présentation des résultats, un traitement statistique des données via **MINITAB** est mis en œuvre. Ce traitement porte sur la quantité produite à la fin de la simulation, et qui varie en fonction de différents scénarios. Par la suite, les idées sont structurées comme suit : la première partie détaille les différentes étapes à effectuer pour réaliser l'analyse de variance (**ANOVA**). La deuxième phase interprète et décrit les effets des différents facteurs expérimentaux ainsi que leurs interactions sur la performance de la mesure et enfin, une comparaison est réalisée entre : les résultats déduits et ceux obtenus par d'autres travaux pertinents qui ont été déjà effectués.

5.2.1. Analyse de variance : ANOVA

L'analyse de variance sur le nombre de commandes complétées des unités produites à la fin de la simulation est présentée dans le tableau 12. À un niveau significatif de **5%**, plusieurs facteurs et interactions possèdent une influence significative sur la performance de la ligne productive, comme entre autres: **S, I, M*P**.

Tableau 12 : ANOVA (1) sur le nombre des unités produites « Q »

Source	DL	SC SEQ	SC AJUST	CM AJUST	F	P
S	2	17112479	17112479	8556239	548.35	0.018
D	2	18868	18868	9434	0.55	0.763
S*D	4	72967	72967	18242	0.73	0.631
I	2	401249901	401249901	200624950	39.57	0.002
S*I	4	2956474	2956474	739119	34.97	0.004
D*I	4	67014	67014	16754	1.08	0.574
S*D*I	8	154667	154667	19333	1.05	0.480
M	2	70436999	70436999	35218500	42.56	0.002
S*M	4	1792994	1792994	448248	19.67	0.005
D*M	4	79618	79618	19904	0.92	0.564
S*D*M	8	173438	173438	21680	1.35	0.363
I*M	4	32635962	32635962	8158990	62.2	0.000
S*I*M	8	941939	941939	117742	6.67	0.011
D*I*M	8	124775	124775	15597	0.96	0.533
S*D*I*M	16	291638	291638	18227	0.94	0.528
P	2	60515258	60515258	30257629	5.25	0.059
S*P	4	69083	69083	17271	0.74	0.632
D*P	4	81065	81065	20266	1.04	0.543
S*D*P	8	159269	159269	19909	1.13	0.442
I*P	4	20280656	20280656	5070164	37.66	0.000
S*I*P	8	172222	172222	21528	1.12	0.439
D*I*P	8	133227	133227	16653	0.94	0.541
S*D*I*P	16	315601	315601	19725	1.01	0.443
M*P	4	3302413	3302413	825603	6.1	0.016
S*M*P	8	147630	147630	18454	1.1	0.460
D*M*P	8	144288	144288	18036	1.17	0.435
S*D*M*P	16	277427	277427	17339	0.89	0.580
I*M*P	8	1064778	1064778	133097	7.86	0.008
S*I*M*P	16	302201	302201	18888	0.97	0.49
D*I*M*P	16	280265	280265	17517	0.9	0.57

S = 139,523 R carré = 99,14 % R carré (ajust) = 98,48 %

Légende :

DL : Degré de Liberté ; **SC** : Somme des Carrés; **F** : Valeur du test Fisher.

Note :

Un facteur ou une interaction sont considérés significatifs, si la valeur de **p** est inférieure à 5%.

S*D : Interaction entre la politique de maintenance appliquée et les défaillances aléatoires.

Le reste du rapport **MINITAB** sera présenté dans l'annexe III.

Dans le but de rendre les résultats d'**ANOVA** plus robustes, une modification est effectuée sur le modèle **ANOVA** : en enlevant toutes les interactions quadruples.

Par la suite, le tableau 13 résume les nouvelles valeurs de **p** déduites.

Tableau 13 : ANOVA (2) sur le nombre des unités produites « Q »

Source	DL	SC SEQ	SC AJUST	CM AJUST	F	P
S	2	17112479	17112479	8556239	445.35	0.000
D	2	18868	18868	9434	0.49	0.612
S*D	4	72967	72967	18242	0.95	0.435
I	2	401249901	401249901	200624950	10442.39	0.000
S*I	4	2956474	2956474	739119	38.47	0.000
D*I	4	67014	67014	16754	0.87	0.481
S*D*I	8	154667	154667	19333	1.01	0.431
M	2	70436999	70436999	35218500	1833.10	0.000
S*M	4	1792994	1792994	448248	23.33	0.000
D*M	4	79618	79618	19904	1.04	0.388
S*D*M	8	173438	173438	21680	1.13	0.343
I*M	4	32635962	32635962	8158990	424.67	0.000
S*I*M	8	941939	941939	117742	6.13	0.000
D*I*M	8	124775	124775	15597	0.81	0.593
P	2	60515258	60515258	30257629	1574.89	0.000
S*P	4	69083	69083	17271	0.90	0.465
D*P	4	81065	81065	20266	1.05	0.379
S*D*P	8	159269	159269	19909	1.04	0.408
I*P	4	20280656	20280656	5070164	263.90	0.000
S*I*P	8	172222	172222	21528	1.12	0.348
D*I*P	8	133227	133227	16653	0.87	0.545
M*P	4	3302413	3302413	825603	42.97	0.000
S*M*P	8	147630	147630	18454	0.96	0.467
D*M*P	8	144288	144288	18036	0.94	0.484
I*M*P	8	1064778	1064778	133097	6.93	0.000

S = 138,609 R carré = 98,90 % R carré (ajust) = 98,50 %

Ce dernier tableau d'**ANOVA** montre que les facteurs et les interactions suivantes sont significatifs pour un niveau de signification égal à 5%:

- S,
- I,
- S*I,
- M,
- S*M,
- P,
- I*P,
- M*P.

5.3. LES EFFETS DES FACTEURS EXPÉRIMENTAUX SUR LE NOMBRE DE COMMANDES COMPLÉTÉES

Cette partie étudie les effets des différents facteurs sur la performance de la ligne de production.

5.3.1. Effet du nombre de stations travaillant en série « M »

La figure 26 présente la courbe de variation de la quantité produite, à la fin de la simulation, en fonction du nombre des machines travaillant en séries. On remarque que la quantité produite diminue quand le nombre de machines travaillant en série croît, ce qui est expliqué par le fait que la matière roule moins vite en passant de 2, 6 à 10 machines. En outre, en revenant aux rapports d'**ARENA**, on constate aussi que l'augmentation des stations influe dans le même sens sur **le temps de passage** des commandes le long de la ligne de production.

En fait, sur un intervalle de 1000 unités produites, une diminution de **90%** est enregistrée au niveau de la quantité Q entre les niveaux 2 et 10.

Ces interprétations sont appuyées par la valeur de **p** retrouvée au tableau d'**ANOVA** et qui vaut 0.

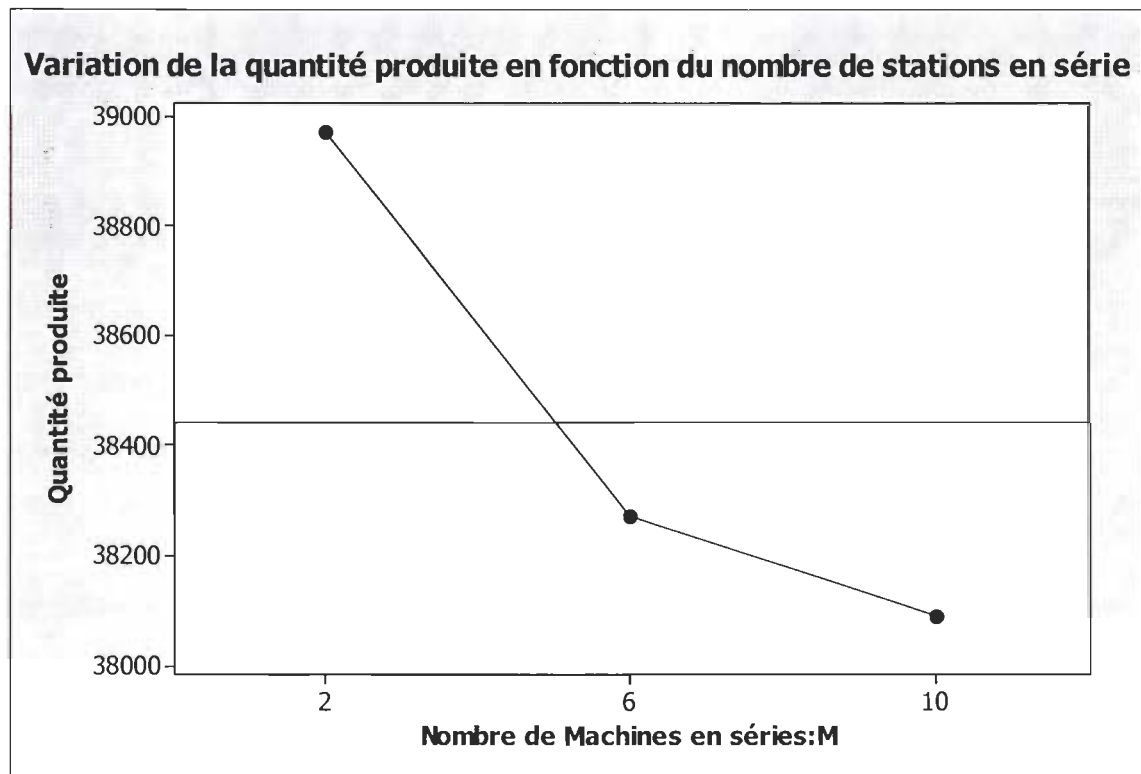


Figure 26 : Variation de la Quantité "Q" en fonction du "M"

5.3.2. Effet de la capacité du stock tampon

Contrairement au cas précédent, l'augmentation au niveau de la capacité du stock tampon provoque une croissance de la quantité produite et ainsi une amélioration de la performance de la ligne de production. Ceci est logique puisque le rôle du stock tampon est de réduire l'impact de la propagation des pannes sur les machines et ainsi éviter l'arrêt total du système. Cela signifie que l'inventaire entre les stations est une valeur ajoutée au système de production.

La figure 27 montre l'effet de l'augmentation de la capacité de l'inventaire sur la quantité fabriquée à la fin de la simulation. En effet, l'augmentation au niveau de la quantité produite entre les niveaux 0 et 6 vaut 80%.

La valeur de p qui vaut 0 est la meilleure preuve que le facteur I est significative sur la performance de la ligne.

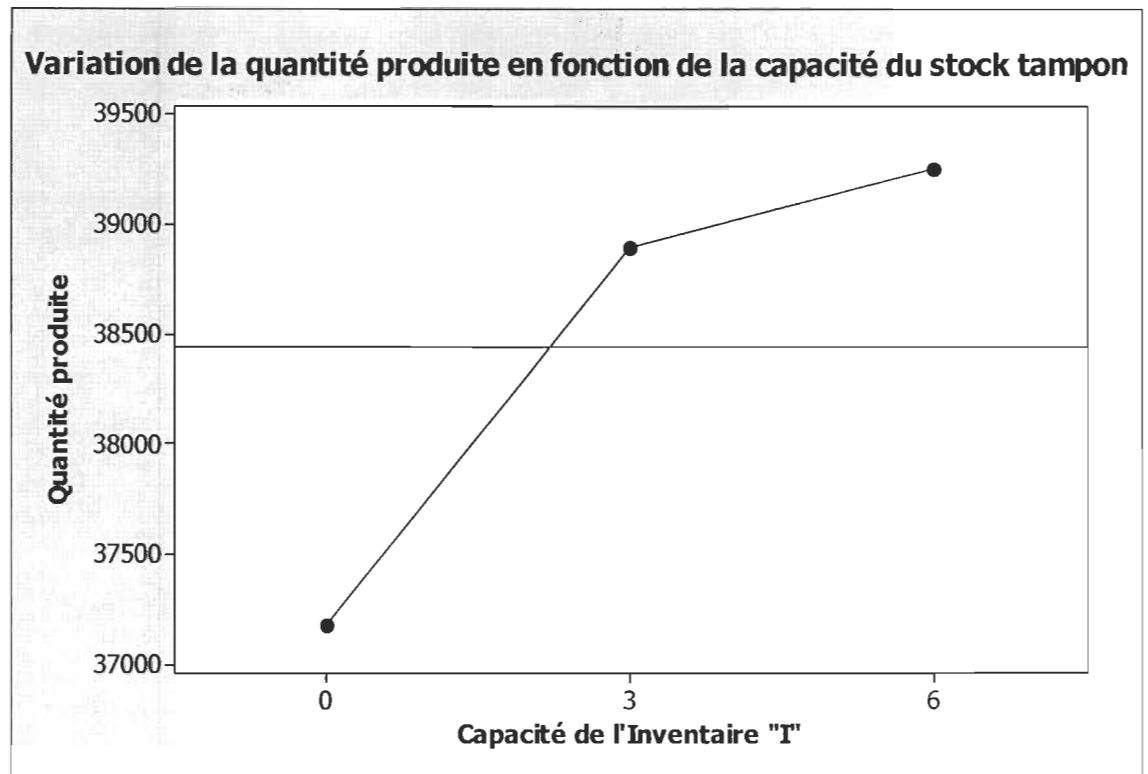


Figure 27 : Variation de la quantité "Q" en fonction de "I"

5.3.3. Effet du coefficient de variation C_v

Pour l'interprétation graphique, on considère le coefficient de variation C_v comme un facteur contrôlable. La diminution du C_v entraîne une augmentation de 90% au niveau de la quantité produite à la fin de la simulation. Ceci est expliqué par le fait que plus il y'a de variabilité dans un système ou une machine, moins bonne est la performance de celle-ci et vice versa.

La figure 28 et la valeur nulle de P appuient cette interprétation.

Note :

Le coefficient de variation C_v est le rapport entre l'écart type et la valeur moyenne de la loi normale assujettis à la cadence de production liée à la machine.

Pour notre cas :

- 3.5 : $C_v=0.28$,
- 4.5 : $C_v=0.22$,
- 5.5 : $C_v=0.18$.

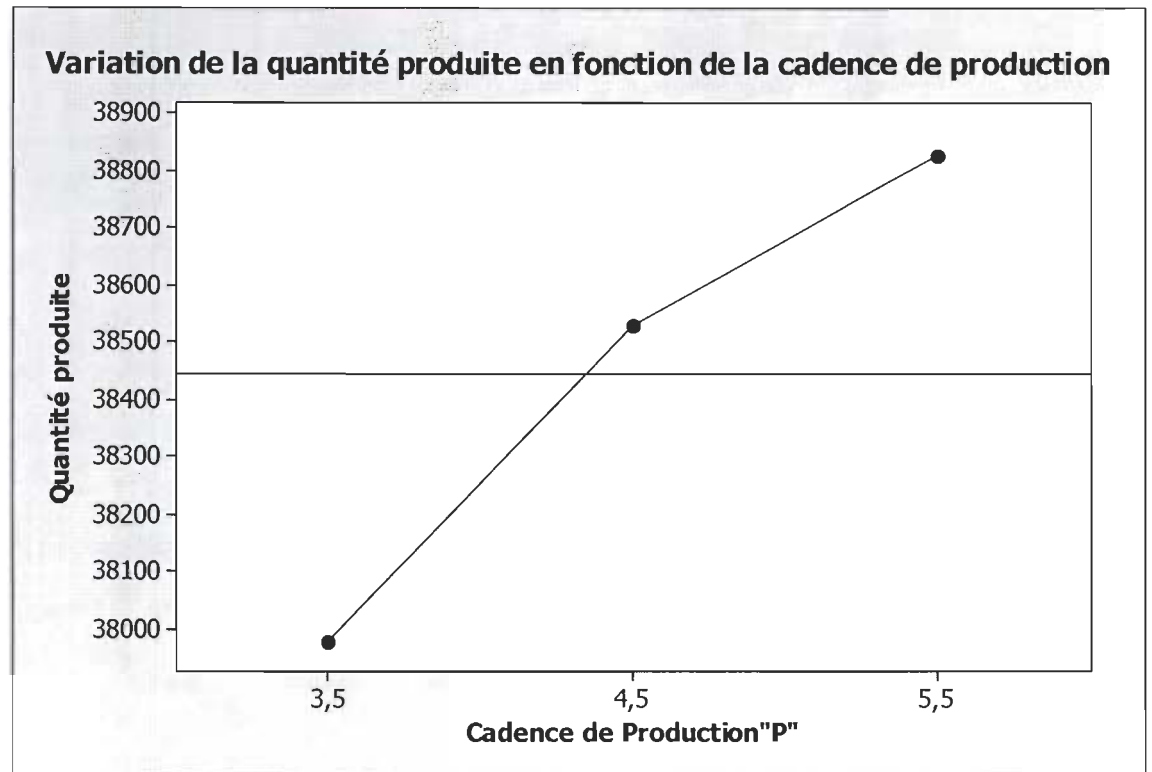


Figure 28 : Variation de la quantité produite" en fonction du Cv

5.3.4. Effet du type de la stratégie de maintenance appliquée

Pour les stratégies de maintenances, on constate que les stratégies bloc (**BRP** et **MBRP**) sont plus performantes que la stratégie âge **ARP** au niveau des résultats. En effet, la quantité produite entre les stratégies âge et Bloc augmente de **95%**. En outre, les deux stratégies **BRP** et **MBRP** fournissent presque le même nombre de commandes complétées à la fin de la production, c'est-à-dire qu'elles ont le même effet sur la performance de la ligne. Ceci prouve l'efficacité de ces dernières politiques de maintenances, pour les systèmes multi-composants, sur la stratégie âge. Cette performance est expliquée par le fait que les stratégies blocs adoptent un temps de réparation minimale inférieur au temps de correction utilisé par la stratégie âge, et par conséquent le temps d'arrêt est minimisé sur la ligne, ce qui améliore la capacité de production du système.

La figure 29 présente l'effet des différentes politiques de maintenance sur la capacité de production de la ligne.

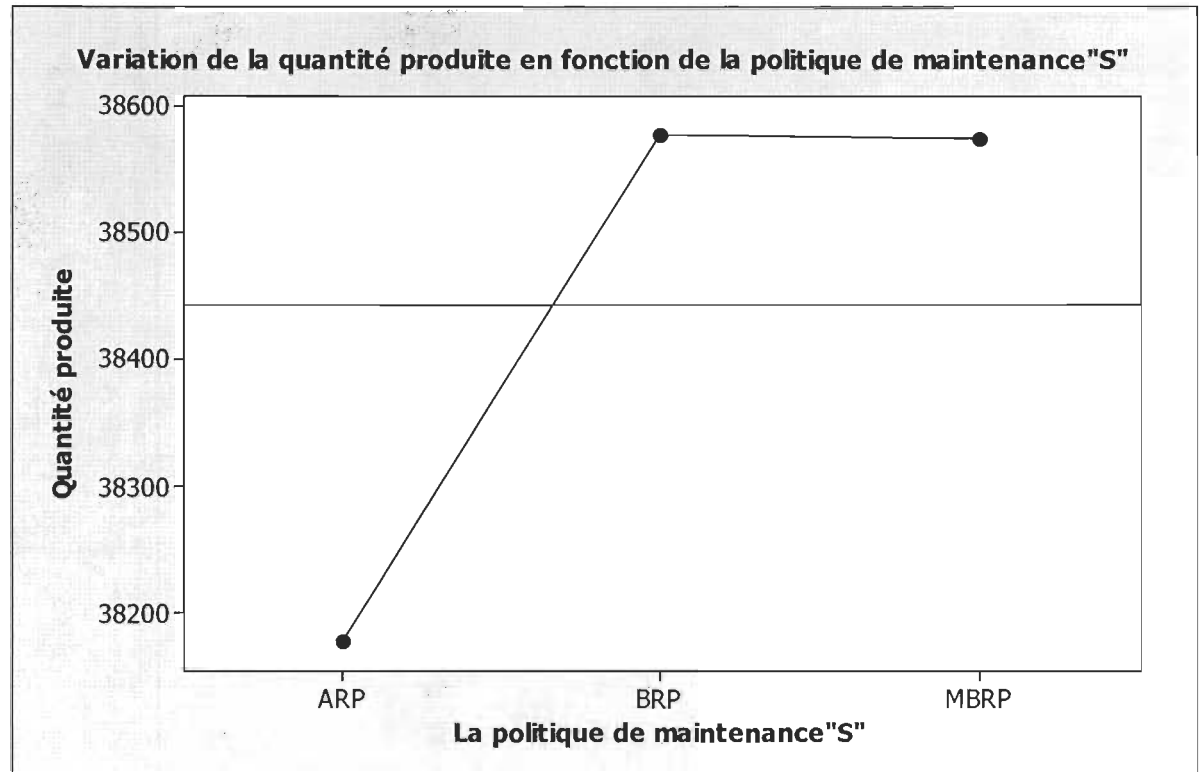


Figure 29 : Effet des stratégies (ARP; BRP ET MBRP) sur la capacité de production

5.3.5. Les effets des interactions doubles sur le nombre de commandes complétées

Le paragraphe suivant s'intéresse aux interactions doubles ayant un effet significatif sur la performance de la ligne de production, citons comme exemple :

- **Effet de l'interaction S*M**

La figure 30 illustre l'interaction des deux facteurs expérimentaux: Le type de la stratégie de maintenance « S » et le nombre de stations travaillant en séries « M ». Cette interaction est significative vu que sa valeur **p** est petite. D'après cette figure, il est bien clair que pour un facteur **M** variant entre 2, 6 et 10 : les stratégies **BRP** et **MBRP** sont identiques et l'interaction entre **S** et **M** n'est pas significative sur la ligne de production. Tandis que, quand le nombre de machine **M** varie entre 2 et 6, la production de la ligne baisse en présence de la stratégie **ARP**.

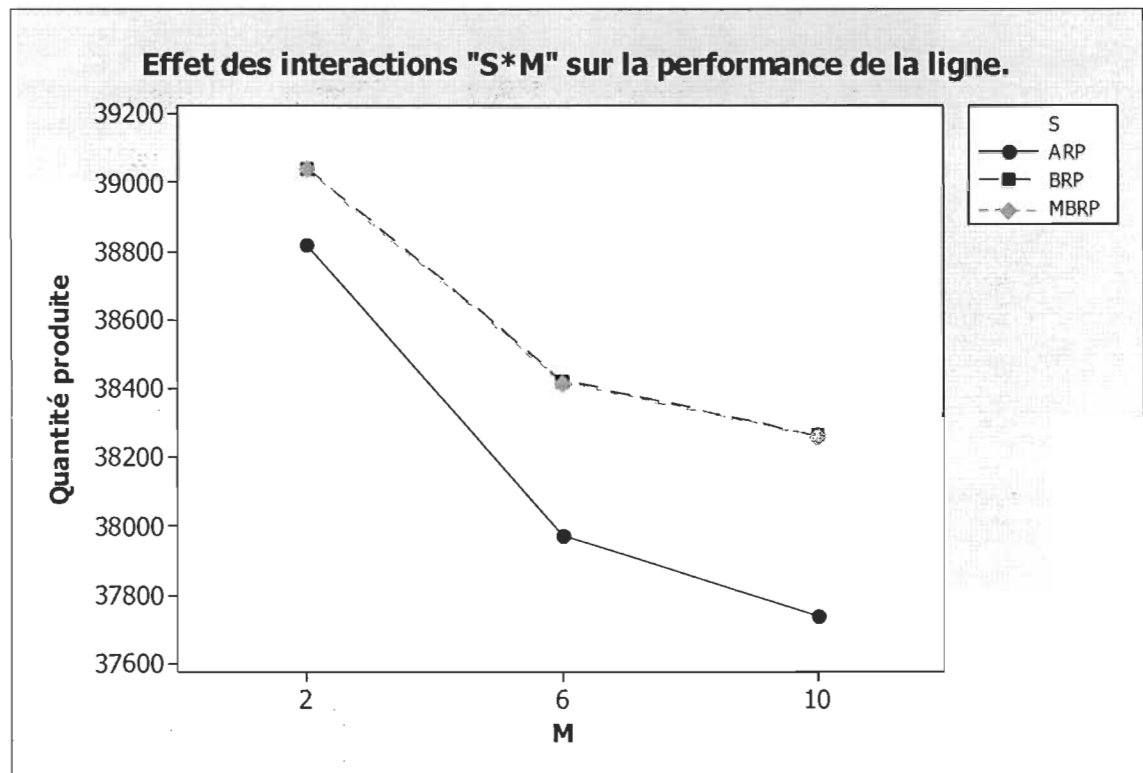


Figure 30 : Effet des interactions "S*M" sur la performance de la ligne

- **Effet de l'interaction I*P**

La figure 31 mentionne l'impact de l'interaction de deux facteurs expérimentaux : la capacité du stock tampon **I** et la loi de distribution de la production **P**, sur la ligne de production. En fait, pour un coefficient de variation C_v variant entre 3.5 et 5.5, l'interaction avec le facteur **I** de niveaux 3 et 6 n'est trop significative. Par contre, avec un inventaire **I** nul, la production de la ligne croît avec l'augmentation du facteur **P** de 3.5 à 5.5.

Ces interprétations numériques prouvent la petite valeur retenue de **p** dans le tableau ANOVA.

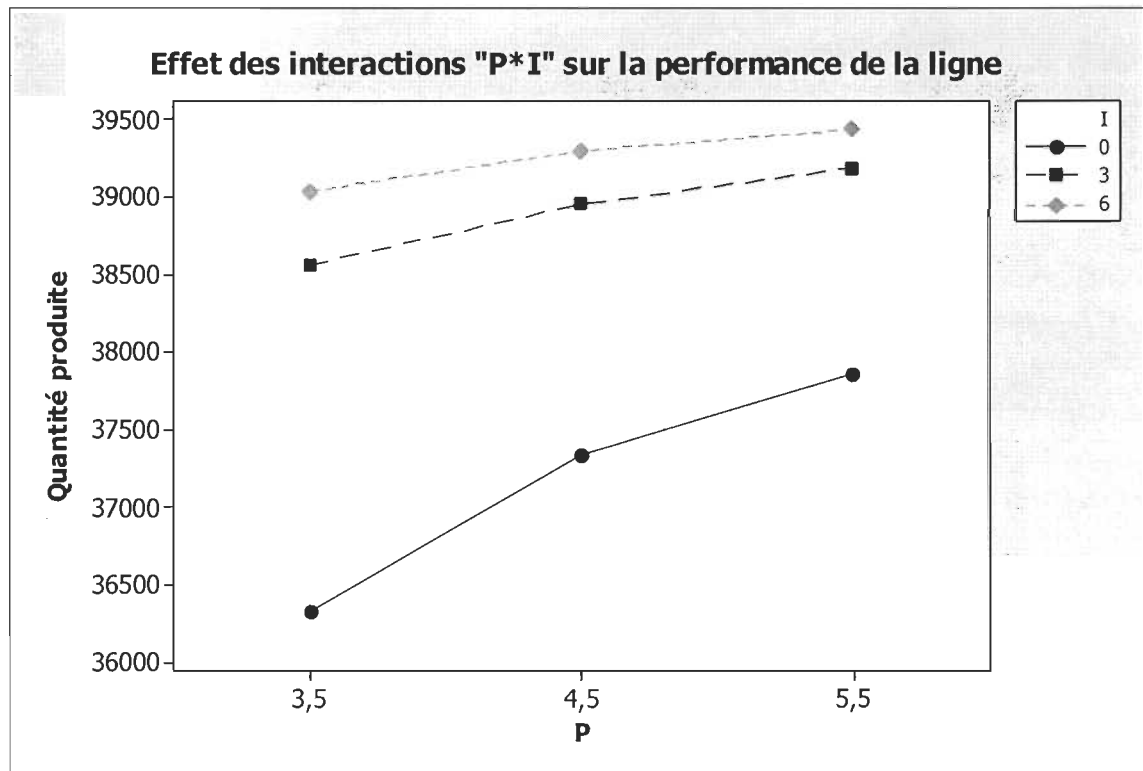


Figure 31 : Effet des interactions $P \times I$ sur la performance de la ligne

- Effet des interactions « $M \times P$ »

Le diagramme présenté par la figure 32, illustre l'influence de deux facteurs M et P sur la performance de la ligne de production. L'interaction « $M \times P$ » possède un effet significatif sur le nombre de quantité produite, puisque sa valeur p dans le tableau ANOVA est petite. L'interaction $M \times P$ est significative pour un facteur M égal à 2 et un facteur P variant entre 3.5 et 5.5. Tandis que pour les niveaux 6 et 10 du facteur M , cette interaction n'est pas trop claire.

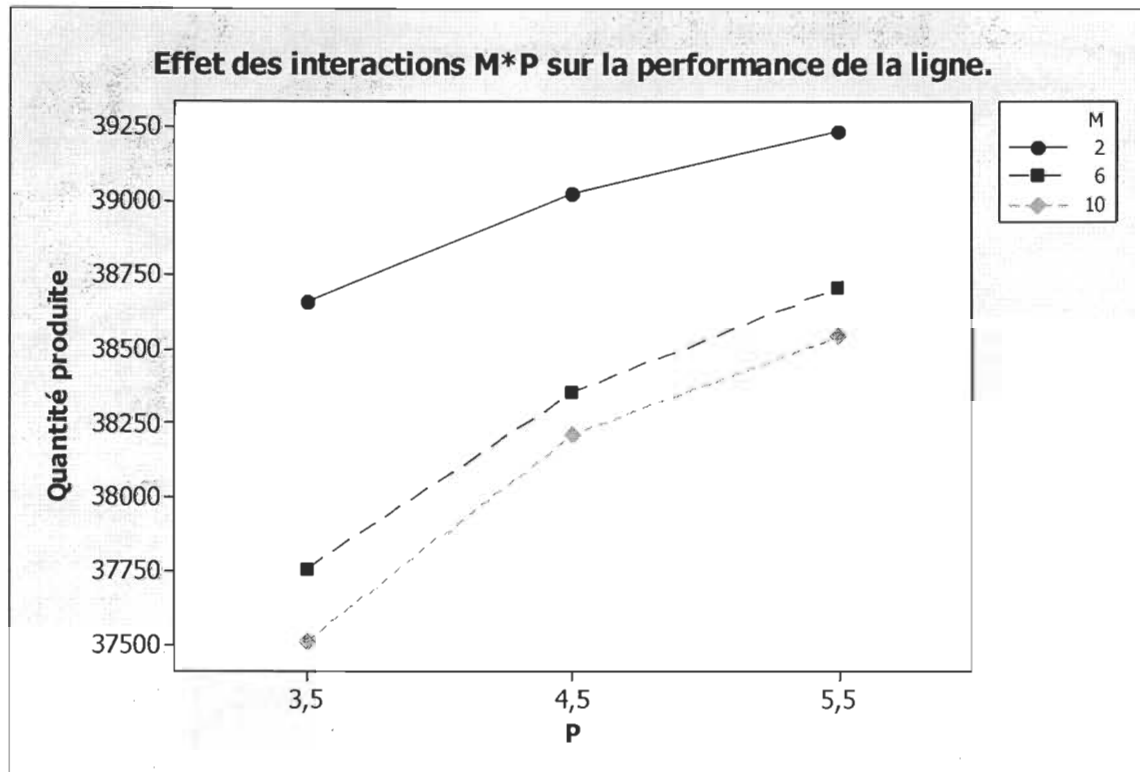


Figure 32 : Effet des interactions M*P sur la performance de la ligne

5.4. SOMMAIRE COMPARATIF AVEC D'AUTRES LECTURES PERTINENTES

Après avoir analysé les résultats des simulations et du traitement des données, le tableau 14, dans lequel il y a une comparaison entre les résultats trouvés et ceux obtenus par d'autres travaux similaires, est mis en œuvre.

Tableau 14 : Sommaire comparatif avec d'autres travaux similaires

Résultats obtenus	Résultats obtenus par d'autres lectures
<ul style="list-style-type: none"> Performance des stratégies Bloc sur les stratégies âge pour les systèmes multi composantes, 	(Thomas, W.A et al, 1996); (Russell, D.M et David, S.K, 1996) ; (Abdul-Nour, G et al, (1995); (Albino,V et al, 1992); (Fleurquin, G et al, 2006) ;(Philip, A.S et Deara, M. 2002)
<ul style="list-style-type: none"> Les stratégies BRP et MBRP possèdent des effets similaires sur le système de production avec un avantage léger du côté MBRP, 	(Fleurquin,G et al, 2006);(Lust, T et al, (2005));
<ul style="list-style-type: none"> la performance des lignes productives croit, en améliorant la capacité du stock tampon, 	(Kevin, B. H, 1991); (Buzacott, J.A. 1971);(Wijngaard,J. 1979); (Sarker,B.R et et al.1989); (Frederick, S.H et So,K.C. 1991)
<ul style="list-style-type: none"> L'augmentation du nombre de stations travaillant en séries réduit la performance de la ligne, 	(Tongambou.G, 1999); (Kevin B. H, 1991);(Yanbing. J, 2007)
<ul style="list-style-type: none"> L'augmentation de la variabilité du temps de production réduit la performance du système de production. 	(Tan, B. (1998));(Tongambou,G, (1999));(J. Wijngaard, 1979); (Sarker,B.R et et al.1989);
<ul style="list-style-type: none"> Les défaillances ont un effet léger sur la performance du système 	(Frederick, S.H et So,K.C. (1991))

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Pour conclure, après l'analyse des résultats obtenus de simulation et l'identification des facteurs ou interaction ayant un effet significatif sur la performance du système de production, les conclusions suivantes sont retenues :

- Les stratégies de maintenance de type Bloc sont plus efficaces que la stratégie âge, et ce, surtout pour les systèmes multi-composants,
- L'augmentation au niveau de la capacité du stock tampon entraîne une croissance au niveau de la productivité,
- La croissance du nombre de stations travaillant en série ralentit le taux de production de la ligne,
- La réduction du coefficient de variabilité C_v améliore la performance des machines et par la suite l'efficacité de toute la ligne de production.

A la lumière de ces interprétations, les objectifs fixés au départ sont bel et bien atteints. En fait, ce travail a permis d'identifier les facteurs qui ont une influence significative sur la performance d'une ligne de production à stock tampon, à savoir essentiellement : les politiques de maintenances, la présence d'une zone de stockage inter-machines, etc.

L'originalité de ce travail consiste à adopter un outil puissant de simulation **ARENA** pour modéliser la ligne de production et pour parcourir les différents scénarios en variant des facteurs expérimentaux rarement utilisés dans d'autres travaux comme facteurs contrôlables, à savoir : le nombre de machines travaillant en série (souvent le nombre de machines est fixe), considération d'une zone de stockage entre les stations.

Cette étude constitue une opportunité extraordinaire de maîtrise de l'outil **ARENA** de simulation, d'avoir une vue d'ensemble sur les notions de base de la maintenance, la production et la fiabilité des systèmes industriels.

Pour finir, plusieurs recommandations peuvent présenter un sujet intéressant de recherche, citons par exemple :

- Modélisation d'un système de production formé par des machines en parallèle,

- Modélisation d'un système de production à configuration hybride,
- Adopter d'autres facteurs expérimentaux, comme par exemple : la nature des systèmes mono ou multi-composants, la capacité des ressources utilisées pour les opérations de maintenances (mécaniciens, etc.), considération des temps de pauses au cours du travail, diversification des produits à fabriquer, utiliser d'autre stratégie de maintenance comme par exemple : **UIRP**, **EIRP**, etc.
- Modélisation et conception des interfaces graphiques via **VBA** sur **ARENA** pour les différents modèles de simulation dans le but de faciliter le travail de gestionnaire dans la modification des différents niveaux des facteurs expérimentaux.

RÉFÉRENCE

1. Abdul-Nour, G., Dudek, R.A et Smith, M.L. (1995). *Effect of maintenance policies on the just in time production system. Int.J.Prod.Res, vol(33).*
2. Ait-Kadi, D. (2003). *Cours de fiabilité des systèmes*. Département en génie mécanique. Université de Laval
3. Ait-Kadi, D; Ouali, M.S. et Gharbi, A. (1999). *A Simulation Model For Opportunistic Maintenance Strategies*. Département de génie mécanique de l'université de Laval, école d'ingénieur de l'université de Moncton et département d'automatique de l'école de technologie supérieure
4. Azadivar, F. (1992). *A Tutorial On simulation optimization. Proceeding of the 1992 winter simulation conference*
5. Albino, V; Carella, G et Geoffrey, O. (1992). *Maintenance Policies in just in time manufacturing lines. Int. J.Prod. Res. Vol (30)*
6. Benedetti, C. A. (2002). *Introduction à la gestion des opérations* (4^e éd). Québec : Sylvain Ménard
7. Ben Daya, M et Alghamdi, A.S. (2000). *On imperfect preventive maintenance model. International Journal of Quality & Reliability Management*, volume 17, numéro 6, pp.661-670
8. Ben Daya, M. (2001). *The Economic production lot-Sizing problem with imperfect production processes and imperfect maintenance. International journal of production economics* 76(2002) 257-264

9. Barlow, R.E et Proschan, F. (1965). *Mathematical theory of Reliability*, J. Wiley, New york
10. Berg, M. et Epstein, B. (1976), *A modified block replacement policy*. *Naval Research logistic quarterly*, 23, page 15-24
11. Beichelt, F. (1982). *A replacement policy based on limits for the repair cost rate*. *IEEE transaction on Reliability* R 31 (4), 401-402
12. Beichelt, F. (2001). *A replacement policy based on limiting the cumulative maintenance cost*. *International Journal of Quality and Reliability management*, Vol.1 (18) , pp 76-83
13. Beichelt, F. (2001). *A replacement policy based on limiting the cumulative maintenance cost*. *International Journal of Quality and Reliability Management*. Vol. 18, No. 1
14. Block, H.W., Langberg, N.A., Savits, T.H., (1993). *Repair replacement policies*. *Journal of Applied Probability* 30(1), 194-206
15. Bai, D.S et Yun, W.Y. (1986). *An Age Replacement Policy with Minimal Repair Cost Limit*. *IEEE Transactions on Reliability*, Vol.R-35, No .4.
16. Bhat, B.R. (1969). *Used item replacement policy*. *University of western Australia*. *Journal of Applied Probability* 6, page 309-318
17. Buzacott, J. A. (1971). *The role of inventory banks in flow line production systems*. *Int. J.Prod. Res. Vol (9)*
18. Crocker, J et Kumar, U.D. (1999). *Age- related maintenance versus reliability centered maintenance: a case study on aero-engines*. *Reliability Engineering and System Safety* 67 (2000) 113-118

19. Chadi, R. (2007). *Modélisation et Analyse des performances des systèmes de production utilisant des stocks tampons à capacités finies*. Doctorat en génie industriel à l'université du Laval
20. Cassady, C.R., Phol, E.A et Murdock, W.P. (2001). *Selective maintenance modeling for industrial systems*. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, volume 7, numéro 2, pp.104-117
21. Carson, Y et Maria, A. (1997). *Simulation optimization: Methods and Applications*. *Proceeding of the 1997 winter simulation conference*
22. Cheikhrouhou, N et Rémy, G. (2003). *Optimisation de lignes de production via simulation : une approche basée sur l'analyse de la perturbation*. *Quatrième conférence de modélisation et simulation. MOSIM 03*.
23. Cléroux, R. (1992). *Fiabilité: Théorie et Application STT 6620*
24. Dekker, R., Roelvink, I.F.K., (1995). *Marginal cost criteria for preventive replacement of a group of component*. *European Journal of Operational Research* 84 (2), 467-480
25. Dekker, R; Frenk, J.B.G et Wildeman, R.E. (1996). *How to determine maintenance frequencies for multicomponent systems, a general approach, in computer and system sciences*, Vol 154, pp 239-280,
26. Dekker, R; Wildeman, R.E; Frank, A; Schouten, V. (1996). *A Review of Multi-Component Maintenance Models with Economic Dependence*. *Technical Report 9605/A, Econometric Institute, Erasmus University Rotterdam*
27. Dekker, R ; Wildeman, R.P. A et Frank, A.V. (1997). *A Review of multi component maintenance Models with economic dependence*. *Mathematical Methods of operation Research* 45: 411-435

28. Drinkwater, R.W and Hastings, N.A.J. (1967). *An economical replacement model. Operational Research Quarterly*, Vol.18, pp.121-38
29. Dragan, A. S.; Godfrey, A. et Jezdimir, K. (1995). Optimal opportunistic maintenance policy using genetic algorithms, 1: formulation, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, volume 1, numéro 2, pp. 34-49
30. Dragan, A. S.; Godfrey, A. et Jezdimir, K.(1995).Optimal opportunistic maintenance policy using genetic algorithms, 1: analysis, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, volume 1, numéro 3, pp.25-34,
31. Dohi, T., Ashioka, A. et Osaki, S. (2001). *Optimizing the repair – time limit replacement schedule with discounting and imperfect repair. Journal of Quality in Maintenance Engineering*. Vol. 7 No 1
32. Draghici, G; Brinzei, N et Filipas, I. (1998). *La modélisation et la simulation en vue de la conduite des systèmes de production*. Universitea Politehnica Din Timisoara
33. Ernest, K. (1958). *Production lines and internal storage A review. Touche, Niven, Bailey and smart, San Francisco, California*
34. Fleurquin, G. Riane, F. Roland, B, Dehombreux, P. et hou, G. (2006) *OPTIMAIN : Plate-forme d'élaboration des stratégies de maintenance de systèmes complexes*. Département de gestion de production et des opérations de la faculté universitaire Cathodique de Mons et service de génie mécanique de Faculté Polytechnique de Mons, Belgique
35. Frederick, S. Hillier; So, K.C. (1991). *The effect of machine breakdowns and interstage storage on the performance of production line systems. Int. J. Prod. Res. Vol. (29)*.

36. Fleurquin, G., Basile, O, Dehombreux, P., Riane, F. (2006). *Aide à la décision pour l'optimisation de politiques de maintenance*.
37. Fagnart, C.(2000). Maintenance préventive , apport de la simulation dans l'analyse des politiques de type « âge » et de type « Bloc ». Facultés universitaires catholiques de Mons
38. Goyal, S.K et Kusy, M.I. (1985). Determining Economic Maintenance Frequency for a Family of Machines. Vol .36, No 12.pp 1125-1128
39. Kevin, B.H. (1991). *The Output processes of serial production lines of exponential machines with finite buffers*. Operation Research. Vol. 40, No 6
40. Lewis, E.E. A. (1994). *Introduction to Reliability Engineering (2e éd)*. Illinois : Jhon Wiley et Sons, Inc
41. Lie, C.H, Chun, Y.H., (1986). *An algorithm for preventive maintenance policy*. *IEEE transaction Reliability* R 35(1), 71-75
42. Lie, C. et Chun, Y. (1986). *An Algorithm for Preventive Maintenance Policy*. *IEEE Transactions on Reliability*, Vol.R-35, No .1
43. Lin, D; Zuo, M. et Yam, R. (2001). *Sequential Imperfect Preventive Maintenance Models with Two categories of Failures Modes*. *Naval Research Logistics*, 48 : 172-183
44. Lai, M- T. (2007). *A periodical replacement model based on cumulative repair – cost limit*. *Wiley InterScience. App. Stochastic Models Bus. Ind.* 23: 455-464
45. Lee, L.C et Seah, K.H.W. (1989). *JIT and the effects of varying Process and set –up times*. *International Journal of Operations and Production Management* , Vol 8,19-35
46. Milette, H. (2008). *Cours de simulations des systèmes industriels*
47. Monchy, F. (2003). *Maintenance Méthodes et Organisations (2e édition)*. Paris: Dunod
48. Meller, R.D., Kim, D S. (1995). *The Impact of preventive maintenance on system cost and buffer size*. *European Journal of Operational Research*. 577-591

49. Nedzela, M. A. (1987). *Modèles Probabilistes D'aide à la décision* (éd). Québec : Avec la collaboration de Jaqueline Gianini
50. Nakagawa, T. et Osaki, S. (1974). *Optimum preventive maintenance policies maximizing the mean time to the first system failure for a two –unit standby redundant system. Optim theor Appl.* 14, 115-29
51. Neelakanteswara, A.R et Bhadury, B. (2000). *Opportunistic maintenance of multi-equipment system: A case study. Quality and Reliability Engineering International.* ; 16:487-500
52. Nakagawa, T., (1984). *Optimal policy of continuous and discrete replacement with minimal repair at failure. Naval Research Logistic quarterly* 31 (4), 543-550
53. Nakagawa, T., (1980). *A summary of imperfect maintenance policies with minimal repair. RAIRO: Recherche Operationnelle* 14, 249-255
54. Nakagawa, T et Mizutani, S. (2008). *Periodic and Sequential Imperfect Preventive Maintenance Policies for Cumulative Damage Models.* Pham, H, *Recent Advances in Reliability and Quality in Design.* Japan: Springer
55. Nicolai, R.P et Dekker, R. (2006). *Optimal Maintenance of Multi component Systems : a Review.* Econometric Institute Report 2006-29.
56. Ouali, M et Yacout, S. (2003). *Optional Preventive replacement policy for two component system. Journal of Decision systems.* Vol. W-n⁰ X/2002
57. Pham, H. et Wang, H. (1996). *Optimal (τ , T) Opportunistic Maintenance of a k-out-of-n: G System with Imperfect PM AND Partial Failure.* Département de génie industriel de l'université de New Jersey 08854-0909
58. Pham, H. (2003). *Preventive Maintenance Models: Replacement, Repair, Ordering, and Inspection.* In Dohi, T., Kaio, N. et Osaki, S. *Handbook of reliability Engineering* (éd). (pp. 349-393). New Jersey, USA: Springer
59. Pichel, D., Dontaine, A., Iassinovski, S., Artiba, A et Fagnart, C. Alix : *une méthode de modélisation des flux d'un système de production*
60. Philip A, S., Deara, M. (2000). *Block Replacement Policies for a two component System With failure Dependence. Wiley Periodicals, Inc. Naval Research Logistics* 50: 70-87, 2003

61. Saheb, N. (2004). *Processus de naissance et de mort et systèmes d'attente markoviens*. Consulté le 21 octobre 2008, tiré de <http://www.dept-info.labri.fr>
62. Saranga, H. (2004). *Opportunistic maintenance using genetic algorithms*. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, volume 10, numéro 1, pp. 66-74
63. Savic, D. A., Walters, D.A. et Knezevic, J. (1995). *Optimal Opportunistic maintenance Policy Using Genetic Algorithms, I: formulation*. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, volume 1, numéro 2, pp. 34-49
64. Savic, D. A., Walters, D.A. et Knezevic, J. (1995). *Optimal Opportunistic maintenance Policy Using Genetic Algorithms, I: Analysis*. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, volume 1, numéro 3, pp.25-34
65. Scarf, P. A. (1997). *On the application of mathematical models in maintenance*. *European Journal of Operational Research*, 99(1997) 493-506
66. Scarf, P.A et Deara, M.(1998). On the development and application of maintenance policies for a two-component system with failure dependence. *IMA journal of Mathematics Applied in Bussiness et industry* 9, p 91-107
67. Sarker, B.R et Fitzsimmons, J.A.(1989). *The performance of push and pull systems: a simulation and comparative study*. *Int. J.Prod. Res. Vol (27)*
68. SO, K.C. (1990). *The Impact of Buffering strategies on the performance of production line systems*. *Int. J. Prod. Res. Vol. (28)*
69. Sloan, T. W. et Shanthikumar, J.G. (2000). *Combined Production And Maintenance Scheduling For A Multiple-Product, Single-Machine Production System*. *Production and Operations Management*, volume 9, numéro 4
70. Tango, T, (1978). *Extended Block replacement policy with used items*. *Journal of applied probability*
71. Thibaut, L.; Riane, F., Olivier, R. (2005). *Plateforme de modélisation, De simulation et d'optimisation des actions de maintenance d'un système multi composants*. *Qualita 2005- 6ème congrès International Pluridisciplinaire Qualité et sûreté de fonctionnement*
72. Tahara, T., Nishida, T., (1975). *Optimal replacement policy for minimal repair model*. *Journal of Operation Research Society of Japan* 18 (3-4), 113-124

73. Tan, B. (1997). *Effect of Variability on the due time performance of a continuous materials flow production system in series*. *Int. J. Prod. Res.* Vol (54)
74. Tongambou Wega, G. (1999). *Effet des règles d'ordonnancement sur la performance d'une ligne de production en juste à temps : Étude par simulation et Désign Expérimental*. Université du Québec à Trois Rivières
75. Thomas, L.C. (1986). A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems. *Reliability Engineering*. Vol 16 pp 297-309
76. Thomas W, A et Dekker, R. (1996). *Modified Block Replacement For multiple component systems*. *IEEE transaction on reliability*. Vol 45. No 1
77. Wang, H., Pham, H., (1999). *Some maintenance models and availability with imperfect maintenance in production systems*. *Annals of Operation Research* 91, 305-318
78. Wang, H. (2001). *A survey of maintenance policies of deteriorating systems*. *European Journal of Operational Research*, 139 (2002) 469-489
79. Wildeman, R.E., Dekker, Frenk, J.B.G. et Egmond, R. V. (1995). *A General Approach for the coordination of maintenance frequencies*. *Technical Report 9539/A*. *Econometric Institute*, Erasmus University Rotterdam, 1995
80. Wildeman, R.E. et Dekker, R. (1996). *Dynamic Influences in Multi-Component Maintenance*. *Econometric Institute*, Erasmus University Rotterdam
81. Wijngaard, J. (1979). *The effect of interstage Buffer Storage on the output of two Unreliable Production Units in series, With Different Production Rates*. *AIIE Transaction*, Vol (11)

Site Internet :

Site 1 :

http://www.arenasimulation.com/Products_OptQuest.aspx. Consulté le 15 Avril 2010.

Site 2 :

http://samplecode.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pp/aro-pt-pp001_-en-p.pdf. Consulté le 15 Avril 2010.

Annexe I

RÉSULTATS DE SIMULATION

OrdreStd	OrdEssai	TypePt	Blocs	S	D	I	M	P	Q
1	1	1	1	ARP	WEIB(2,400)	0	2	3,5	37466
2	2	1	1	ARP	WEIB(2,400)	0	2	4,5	38115
3	3	1	1	ARP	WEIB(2,400)	0	2	5,5	38486
4	4	1	1	ARP	WEIB(2,400)	0	6	3,5	35475
5	5	1	1	ARP	WEIB(2,400)	0	6	4,5	36470
6	6	1	1	ARP	WEIB(2,400)	0	6	5,5	37129
7	7	1	1	ARP	WEIB(2,400)	0	10	3,5	34818
8	8	1	1	ARP	WEIB(2,400)	0	10	4,5	35907
9	9	1	1	ARP	WEIB(2,400)	0	10	5,5	36460
10	10	1	1	ARP	WEIB(2,400)	3	2	3,5	38908
11	11	1	1	ARP	WEIB(2,400)	3	2	4,5	39151
12	12	1	1	ARP	WEIB(2,400)	3	2	5,5	39258
13	13	1	1	ARP	WEIB(2,400)	3	6	3,5	38178
14	14	1	1	ARP	WEIB(2,400)	3	6	4,5	38590
15	15	1	1	ARP	WEIB(2,400)	3	6	5,5	38887
16	16	1	1	ARP	WEIB(2,400)	3	10	3,5	37911
17	17	1	1	ARP	WEIB(2,400)	3	10	4,5	38481
18	18	1	1	ARP	WEIB(2,400)	3	10	5,5	38718
19	19	1	1	ARP	WEIB(2,400)	6	2	3,5	39241
20	20	1	1	ARP	WEIB(2,400)	6	2	4,5	39379
21	21	1	1	ARP	WEIB(2,400)	6	2	5,5	39430
22	22	1	1	ARP	WEIB(2,400)	6	6	3,5	38720
23	23	1	1	ARP	WEIB(2,400)	6	6	4,5	39064
24	24	1	1	ARP	WEIB(2,400)	6	6	5,5	39260
25	25	1	1	ARP	WEIB(2,400)	6	10	3,5	38711
26	26	1	1	ARP	WEIB(2,400)	6	10	4,5	38975
27	27	1	1	ARP	WEIB(2,400)	6	10	5,5	39157
28	28	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	0	2	3,5	37403
29	29	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	0	2	4,5	38110
30	30	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	0	2	5,5	38502
31	31	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	0	6	3,5	35394
32	32	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	0	6	4,5	36459

33	33	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	0	6	5,5	37089
34	34	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	0	10	3,5	34800
35	35	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	0	10	4,5	35903
36	36	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	0	10	5,5	36539
37	37	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	3	2	3,5	38809
38	38	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	3	2	4,5	39155
39	39	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	3	2	5,5	39288
40	40	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	3	6	3,5	38135
41	41	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	3	6	4,5	38583
42	42	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	3	6	5,5	38810
43	43	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	3	10	3,5	37913
44	44	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	3	10	4,5	38380
45	45	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	3	10	5,5	38733
46	46	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	6	2	3,5	39202
47	47	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	6	2	4,5	39320
48	48	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	6	2	5,5	39457
49	49	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	6	6	3,5	38764
50	50	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	6	6	4,5	39030
51	51	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	6	6	5,5	39216
52	52	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	6	10	3,5	38656
53	53	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	6	10	4,5	39003
54	54	1	1	ARP	WEIB(3,5,400)	6	10	5,5	39176
55	55	1	1	ARP	WEIB(5,400)	0	2	3,5	37443
56	56	1	1	ARP	WEIB(5,400)	0	2	4,5	38113
57	57	1	1	ARP	WEIB(5,400)	0	2	5,5	38498
58	58	1	1	ARP	WEIB(5,400)	0	6	3,5	35395
59	59	1	1	ARP	WEIB(5,400)	0	6	4,5	36447
60	60	1	1	ARP	WEIB(5,400)	0	6	5,5	37062
61	61	1	1	ARP	WEIB(5,400)	0	10	3,5	34746
62	62	1	1	ARP	WEIB(5,400)	0	10	4,5	38858
63	63	1	1	ARP	WEIB(5,400)	0	10	5,5	36524
64	64	1	1	ARP	WEIB(5,400)	3	2	3,5	38838
65	65	1	1	ARP	WEIB(5,400)	3	2	4,5	39093

66	66	1	1	ARP	WEIB(5,400)	3	2	5,5	39238
67	67	1	1	ARP	WEIB(5,400)	3	6	3,5	38143
68	68	1	1	ARP	WEIB(5,400)	3	6	4,5	38510
69	69	1	1	ARP	WEIB(5,400)	3	6	5,5	38824
70	70	1	1	ARP	WEIB(5,400)	3	10	3,5	37980
71	71	1	1	ARP	WEIB(5,400)	3	10	4,5	38424
72	72	1	1	ARP	WEIB(5,400)	3	10	5,5	38741
73	73	1	1	ARP	WEIB(5,400)	6	2	3,5	39172
74	74	1	1	ARP	WEIB(5,400)	6	2	4,5	39360
75	75	1	1	ARP	WEIB(5,400)	6	2	5,5	39430
76	76	1	1	ARP	WEIB(5,400)	6	6	3,5	38786
77	77	1	1	ARP	WEIB(5,400)	6	6	4,5	39062
78	78	1	1	ARP	WEIB(5,400)	6	6	5,5	39246
79	79	1	1	ARP	WEIB(5,400)	6	10	3,5	38674
80	80	1	1	ARP	WEIB(5,400)	6	10	4,5	38990
81	81	1	1	ARP	WEIB(5,400)	6	10	5,5	39168
82	82	1	1	BRP	WEIB(2,400)	0	2	3,5	37664
83	83	1	1	BRP	WEIB(2,400)	0	2	4,5	38380
84	84	1	1	BRP	WEIB(2,400)	0	2	5,5	38757
85	85	1	1	BRP	WEIB(2,400)	0	6	3,5	36170
86	86	1	1	BRP	WEIB(2,400)	0	6	4,5	37218
87	87	1	1	BRP	WEIB(2,400)	0	6	5,5	37857
88	88	1	1	BRP	WEIB(2,400)	0	10	3,5	35776
89	89	1	1	BRP	WEIB(2,400)	0	10	4,5	36908
90	90	1	1	BRP	WEIB(2,400)	0	10	5,5	37623
91	91	1	1	BRP	WEIB(2,400)	3	2	3,5	39094
92	92	1	1	BRP	WEIB(2,400)	3	2	4,5	39321
93	93	1	1	BRP	WEIB(2,400)	3	2	5,5	39522
94	94	1	1	BRP	WEIB(2,400)	3	6	3,5	38479
95	95	1	1	BRP	WEIB(2,400)	3	6	4,5	38990
96	96	1	1	BRP	WEIB(2,400)	3	6	5,5	39228
97	97	1	1	BRP	WEIB(2,400)	3	10	3,5	38400
98	98	1	1	BRP	WEIB(2,400)	3	10	4,5	38869

99	99	1	1	BRP	WEIB(2,400)	3	10	5,5	39156
100	100	1	1	BRP	WEIB(2,400)	6	2	3,5	39309
101	101	1	1	BRP	WEIB(2,400)	6	2	4,5	39566
102	102	1	1	BRP	WEIB(2,400)	6	2	5,5	39652
103	103	1	1	BRP	WEIB(2,400)	6	6	3,5	39041
104	104	1	1	BRP	WEIB(2,400)	6	6	4,5	39322
105	105	1	1	BRP	WEIB(2,400)	6	6	5,5	39477
106	106	1	1	BRP	WEIB(2,400)	6	10	3,5	38927
107	107	1	1	BRP	WEIB(2,400)	6	10	4,5	39248
108	108	1	1	BRP	WEIB(2,400)	6	10	5,5	39428
109	109	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	0	2	3,5	37689
110	110	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	0	2	4,5	38363
111	111	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	0	2	5,5	38774
112	112	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	0	6	3,5	36145
113	113	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	0	6	4,5	37203
114	114	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	0	6	5,5	37850
115	115	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	0	10	3,5	35733
116	116	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	0	10	4,5	36930
117	117	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	0	10	5,5	37618
118	118	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	3	2	3,5	39057
119	119	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	3	2	4,5	39327
120	120	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	3	2	5,5	39501
121	121	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	3	6	3,5	38529
122	122	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	3	6	4,5	38950
123	123	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	3	6	5,5	39233
124	124	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	3	10	3,5	38376
125	125	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	3	10	4,5	38862
126	126	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	3	10	5,5	39139
127	127	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	6	2	3,5	39349
128	128	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	6	2	4,5	39546
129	129	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	6	2	5,5	39638
130	130	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	6	6	3,5	38989
131	131	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	6	6	4,5	39260

132	132	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	6	6	5,5	39464
133	133	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	6	10	3,5	38944
134	134	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	6	10	4,5	39224
135	135	1	1	BRP	WEIB(3,5,400)	6	10	5,5	39396
136	136	1	1	BRP	WEIB(5,400)	0	2	3,5	37654
137	137	1	1	BRP	WEIB(5,400)	0	2	4,5	38355
138	138	1	1	BRP	WEIB(5,400)	0	2	5,5	38767
139	139	1	1	BRP	WEIB(5,400)	0	6	3,5	36134
140	140	1	1	BRP	WEIB(5,400)	0	6	4,5	37215
141	141	1	1	BRP	WEIB(5,400)	0	6	5,5	37870
142	142	1	1	BRP	WEIB(5,400)	0	10	3,5	35767
143	143	1	1	BRP	WEIB(5,400)	0	10	4,5	36892
144	144	1	1	BRP	WEIB(5,400)	0	10	5,5	37635
145	145	1	1	BRP	WEIB(5,400)	3	2	3,5	39074
146	146	1	1	BRP	WEIB(5,400)	3	2	4,5	39329
147	147	1	1	BRP	WEIB(5,400)	3	2	5,5	39491
148	148	1	1	BRP	WEIB(5,400)	3	6	3,5	38517
149	149	1	1	BRP	WEIB(5,400)	3	6	4,5	38969
150	150	1	1	BRP	WEIB(5,400)	3	6	5,5	39218
151	151	1	1	BRP	WEIB(5,400)	3	10	3,5	38376
152	152	1	1	BRP	WEIB(5,400)	3	10	4,5	38886
153	153	1	1	BRP	WEIB(5,400)	3	10	5,5	39149
154	154	1	1	BRP	WEIB(5,400)	6	2	3,5	39343
155	155	1	1	BRP	WEIB(5,400)	6	2	4,5	39515
156	156	1	1	BRP	WEIB(5,400)	6	2	5,5	39639
157	157	1	1	BRP	WEIB(5,400)	6	6	3,5	39011
158	158	1	1	BRP	WEIB(5,400)	6	6	4,5	39279
159	159	1	1	BRP	WEIB(5,400)	6	6	5,5	39462
160	160	1	1	BRP	WEIB(5,400)	6	10	3,5	38880
161	161	1	1	BRP	WEIB(5,400)	6	10	4,5	39256
162	162	1	1	BRP	WEIB(5,400)	6	10	5,5	39419
163	163	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	0	2	3,5	37704
164	164	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	0	2	4,5	38381

165	165	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	0	2	5,5	38790
166	166	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	0	6	3,5	36116
167	167	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	0	6	4,5	37218
168	168	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	0	6	5,5	37862
169	169	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	0	10	3,5	35767
170	170	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	0	10	4,5	36935
171	171	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	0	10	5,5	37619
172	172	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	3	2	3,5	39084
173	173	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	3	2	4,5	39361
174	174	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	3	2	5,5	39459
175	175	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	3	6	3,5	38500
176	176	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	3	6	4,5	38968
177	177	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	3	6	5,5	39224
178	178	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	3	10	3,5	38355
179	179	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	3	10	4,5	38846
180	180	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	3	10	5,5	39166
181	181	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	6	2	3,5	39363
182	182	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	6	2	4,5	39557
183	183	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	6	2	5,5	39627
184	184	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	6	6	3,5	39011
185	185	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	6	6	4,5	39293
186	186	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	6	6	5,5	39414
187	187	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	6	10	3,5	38964
188	188	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	6	10	4,5	39282
189	189	1	1	MBRP	WEIB(2,400)	6	10	5,5	39404
190	190	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	2	3,5	37667
191	191	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	2	4,5	38360
192	192	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	2	5,5	38754
193	193	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	6	3,5	36102
194	194	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	6	4,5	37188
195	195	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	6	5,5	37854
196	196	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	10	3,5	35719
197	197	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	10	4,5	36888

198	198	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	10	5,5	37640
199	199	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	2	3,5	39089
200	200	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	2	4,5	39328
201	201	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	2	5,5	39524
202	202	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	6	3,5	38520
203	203	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	6	4,5	38951
204	204	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	6	5,5	39194
205	205	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	10	3,5	38397
206	206	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	10	4,5	38881
207	207	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	10	5,5	39170
208	208	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	2	3,5	39331
209	209	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	2	4,5	39509
210	210	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	2	5,5	39620
211	211	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	6	3,5	39011
212	212	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	6	4,5	39318
213	213	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	6	5,5	39463
214	214	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	10	3,5	38953
215	215	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	10	4,5	39224
216	216	1	1	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	10	5,5	39417
217	217	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	0	2	3,5	37661
218	218	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	0	2	4,5	38352
219	219	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	0	2	5,5	38756
220	220	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	0	6	3,5	36113
221	221	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	0	6	4,5	37185
222	222	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	0	6	5,5	37873
223	223	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	0	10	3,5	35755
224	224	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	0	10	4,5	36893
225	225	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	0	10	5,5	37603
226	226	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	3	2	3,5	39106
227	227	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	3	2	4,5	39326
228	228	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	3	2	5,5	39500
229	229	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	3	6	3,5	38520
230	230	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	3	6	4,5	38968

231	231	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	3	6	5,5	39202
232	232	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	3	10	3,5	38341
233	233	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	3	10	4,5	38829
234	234	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	3	10	5,5	39152
235	235	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	6	2	3,5	39343
236	236	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	6	2	4,5	39511
237	237	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	6	2	5,5	39613
238	238	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	6	6	3,5	39014
239	239	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	6	6	4,5	39265
240	240	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	6	6	5,5	39422
241	241	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	6	10	3,5	38924
242	242	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	6	10	4,5	39249
243	243	1	1	MBRP	WEIB(5,400)	6	10	5,5	39414
244	244	1	2	ARP	WEIB(2,400)	0	2	3,5	37507
245	245	1	2	ARP	WEIB(2,400)	0	2	4,5	38162
246	246	1	2	ARP	WEIB(2,400)	0	2	5,5	38528
247	247	1	2	ARP	WEIB(2,400)	0	6	3,5	35501
248	248	1	2	ARP	WEIB(2,400)	0	6	4,5	36503
249	249	1	2	ARP	WEIB(2,400)	0	6	5,5	37155
250	250	1	2	ARP	WEIB(2,400)	0	10	3,5	34849
251	251	1	2	ARP	WEIB(2,400)	0	10	4,5	35889
252	252	1	2	ARP	WEIB(2,400)	0	10	5,5	36574
253	253	1	2	ARP	WEIB(2,400)	3	2	3,5	38891
254	254	1	2	ARP	WEIB(2,400)	3	2	4,5	39155
255	255	1	2	ARP	WEIB(2,400)	3	2	5,5	39274
256	256	1	2	ARP	WEIB(2,400)	3	6	3,5	38201
257	257	1	2	ARP	WEIB(2,400)	3	6	4,5	38602
258	258	1	2	ARP	WEIB(2,400)	3	6	5,5	38890
259	259	1	2	ARP	WEIB(2,400)	3	10	3,5	38000
260	260	1	2	ARP	WEIB(2,400)	3	10	4,5	38418
261	261	1	2	ARP	WEIB(2,400)	3	10	5,5	38748
262	262	1	2	ARP	WEIB(2,400)	6	2	3,5	39268
263	263	1	2	ARP	WEIB(2,400)	6	2	4,5	39382

264	264	1	2	ARP	WEIB(2,400)	6	2	5,5	39466
265	265	1	2	ARP	WEIB(2,400)	6	6	3,5	38780
266	266	1	2	ARP	WEIB(2,400)	6	6	4,5	39060
267	267	1	2	ARP	WEIB(2,400)	6	6	5,5	39231
268	268	1	2	ARP	WEIB(2,400)	6	10	3,5	38632
269	269	1	2	ARP	WEIB(2,400)	6	10	4,5	39012
270	270	1	2	ARP	WEIB(2,400)	6	10	5,5	39130
271	271	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	0	2	3,5	37457
272	272	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	0	2	4,5	38133
273	273	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	0	2	5,5	38488
274	274	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	0	6	3,5	35445
275	275	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	0	6	4,5	36478
276	276	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	0	6	5,5	37160
277	277	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	0	10	3,5	34757
278	278	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	0	10	4,5	35843
279	279	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	0	10	5,5	36592
280	280	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	3	2	3,5	38892
281	281	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	3	2	4,5	39118
282	282	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	3	2	5,5	39333
283	283	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	3	6	3,5	38166
284	284	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	3	6	4,5	38620
285	285	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	3	6	5,5	38866
286	286	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	3	10	3,5	37982
287	287	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	3	10	4,5	38445
288	288	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	3	10	5,5	38715
289	289	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	6	2	3,5	39188
290	290	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	6	2	4,5	39389
291	291	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	6	2	5,5	39511
292	292	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	6	6	3,5	38816
293	293	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	6	6	4,5	39105
294	294	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	6	6	5,5	39262
295	295	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	6	10	3,5	38678
296	296	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	6	10	4,5	38976

297	297	1	2	ARP	WEIB(3,5,400)	6	10	5,5	39167
298	298	1	2	ARP	WEIB(5,400)	0	2	3,5	37458
299	299	1	2	ARP	WEIB(5,400)	0	2	4,5	38110
300	300	1	2	ARP	WEIB(5,400)	0	2	5,5	38534
301	301	1	2	ARP	WEIB(5,400)	0	6	3,5	35493
302	302	1	2	ARP	WEIB(5,400)	0	6	4,5	36527
303	303	1	2	ARP	WEIB(5,400)	0	6	5,5	37113
304	304	1	2	ARP	WEIB(5,400)	0	10	3,5	34810
305	305	1	2	ARP	WEIB(5,400)	0	10	4,5	35867
306	306	1	2	ARP	WEIB(5,400)	0	10	5,5	36572
307	307	1	2	ARP	WEIB(5,400)	3	2	3,5	38844
308	308	1	2	ARP	WEIB(5,400)	3	2	4,5	39179
309	309	1	2	ARP	WEIB(5,400)	3	2	5,5	39292
310	310	1	2	ARP	WEIB(5,400)	3	6	3,5	38136
311	311	1	2	ARP	WEIB(5,400)	3	6	4,5	38639
312	312	1	2	ARP	WEIB(5,400)	3	6	5,5	38866
313	313	1	2	ARP	WEIB(5,400)	3	10	3,5	37943
314	314	1	2	ARP	WEIB(5,400)	3	10	4,5	38422
315	315	1	2	ARP	WEIB(5,400)	3	10	5,5	38700
316	316	1	2	ARP	WEIB(5,400)	6	2	3,5	39244
317	317	1	2	ARP	WEIB(5,400)	6	2	4,5	39364
318	318	1	2	ARP	WEIB(5,400)	6	2	5,5	39488
319	319	1	2	ARP	WEIB(5,400)	6	6	3,5	38753
320	320	1	2	ARP	WEIB(5,400)	6	6	4,5	39093
321	321	1	2	ARP	WEIB(5,400)	6	6	5,5	39233
322	322	1	2	ARP	WEIB(5,400)	6	10	3,5	38684
323	323	1	2	ARP	WEIB(5,400)	6	10	4,5	38998
324	324	1	2	ARP	WEIB(5,400)	6	10	5,5	39187
325	325	1	2	BRP	WEIB(2,400)	0	2	3,5	37751
326	326	1	2	BRP	WEIB(2,400)	0	2	4,5	38447
327	327	1	2	BRP	WEIB(2,400)	0	2	5,5	38786
328	328	1	2	BRP	WEIB(2,400)	0	6	3,5	36138
329	329	1	2	BRP	WEIB(2,400)	0	6	4,5	37266

330	330	1	2	BRP	WEIB(2,400)	0	6	5,5	37925
331	331	1	2	BRP	WEIB(2,400)	0	10	3,5	35782
332	332	1	2	BRP	WEIB(2,400)	0	10	4,5	36985
333	333	1	2	BRP	WEIB(2,400)	0	10	5,5	37661
334	334	1	2	BRP	WEIB(2,400)	3	2	3,5	39086
335	335	1	2	BRP	WEIB(2,400)	3	2	4,5	39399
336	336	1	2	BRP	WEIB(2,400)	3	2	5,5	39534
337	337	1	2	BRP	WEIB(2,400)	3	6	3,5	38541
338	338	1	2	BRP	WEIB(2,400)	3	6	4,5	38993
339	339	1	2	BRP	WEIB(2,400)	3	6	5,5	39229
340	340	1	2	BRP	WEIB(2,400)	3	10	3,5	38432
341	341	1	2	BRP	WEIB(2,400)	3	10	4,5	38890
342	342	1	2	BRP	WEIB(2,400)	3	10	5,5	39153
343	343	1	2	BRP	WEIB(2,400)	6	2	3,5	39436
344	344	1	2	BRP	WEIB(2,400)	6	2	4,5	39585
345	345	1	2	BRP	WEIB(2,400)	6	2	5,5	39653
346	346	1	2	BRP	WEIB(2,400)	6	6	3,5	39111
347	347	1	2	BRP	WEIB(2,400)	6	6	4,5	39303
348	348	1	2	BRP	WEIB(2,400)	6	6	5,5	39462
349	349	1	2	BRP	WEIB(2,400)	6	10	3,5	38977
350	350	1	2	BRP	WEIB(2,400)	6	10	4,5	39244
351	351	1	2	BRP	WEIB(2,400)	6	10	5,5	39421
352	352	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	0	2	3,5	37747
353	353	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	0	2	4,5	38407
354	354	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	0	2	5,5	38801
355	355	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	0	6	3,5	36161
356	356	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	0	6	4,5	37203
357	357	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	0	6	5,5	37907
358	358	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	0	10	3,5	35787
359	359	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	0	10	4,5	36962
360	360	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	0	10	5,5	37665
361	361	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	3	2	3,5	39140
362	362	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	3	2	4,5	39366

363	363	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	3	2	5,5	39527
364	364	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	3	6	3,5	38566
365	365	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	3	6	4,5	38991
366	366	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	3	6	5,5	39275
367	367	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	3	10	3,5	38358
368	368	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	3	10	4,5	38886
369	369	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	3	10	5,5	39175
370	370	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	6	2	3,5	39410
371	371	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	6	2	4,5	39547
372	372	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	6	2	5,5	39673
373	373	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	6	6	3,5	39064
374	374	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	6	6	4,5	39324
375	375	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	6	6	5,5	39504
376	376	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	6	10	3,5	38975
377	377	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	6	10	4,5	39272
378	378	1	2	BRP	WEIB(3,5,400)	6	10	5,5	39420
379	379	1	2	BRP	WEIB(5,400)	0	2	3,5	37756
380	380	1	2	BRP	WEIB(5,400)	0	2	4,5	38430
381	381	1	2	BRP	WEIB(5,400)	0	2	5,5	38801
382	382	1	2	BRP	WEIB(5,400)	0	6	3,5	36134
383	383	1	2	BRP	WEIB(5,400)	0	6	4,5	37203
384	384	1	2	BRP	WEIB(5,400)	0	6	5,5	37904
385	385	1	2	BRP	WEIB(5,400)	0	10	3,5	35770
386	386	1	2	BRP	WEIB(5,400)	0	10	4,5	36919
387	387	1	2	BRP	WEIB(5,400)	0	10	5,5	37612
388	388	1	2	BRP	WEIB(5,400)	3	2	3,5	39106
389	389	1	2	BRP	WEIB(5,400)	3	2	4,5	39390
390	390	1	2	BRP	WEIB(5,400)	3	2	5,5	39528
391	391	1	2	BRP	WEIB(5,400)	3	6	3,5	38580
392	392	1	2	BRP	WEIB(5,400)	3	6	4,5	39042
393	393	1	2	BRP	WEIB(5,400)	3	6	5,5	39247
394	394	1	2	BRP	WEIB(5,400)	3	10	3,5	38381
395	395	1	2	BRP	WEIB(5,400)	3	10	4,5	38874

396	396	1	2	BRP	WEIB(5,400)	3	10	5,5	39168
397	397	1	2	BRP	WEIB(5,400)	6	2	3,5	39358
398	398	1	2	BRP	WEIB(5,400)	6	2	4,5	39577
399	399	1	2	BRP	WEIB(5,400)	6	2	5,5	39624
400	400	1	2	BRP	WEIB(5,400)	6	6	3,5	39035
401	401	1	2	BRP	WEIB(5,400)	6	6	4,5	39349
402	402	1	2	BRP	WEIB(5,400)	6	6	5,5	39474
403	403	1	2	BRP	WEIB(5,400)	6	10	3,5	38930
404	404	1	2	BRP	WEIB(5,400)	6	10	4,5	39236
405	405	1	2	BRP	WEIB(5,400)	6	10	5,5	39423
406	406	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	0	2	3,5	37763
407	407	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	0	2	4,5	38401
408	408	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	0	2	5,5	38795
409	409	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	0	6	3,5	36178
410	410	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	0	6	4,5	37178
411	411	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	0	6	5,5	37898
412	412	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	0	10	3,5	35778
413	413	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	0	10	4,5	36931
414	414	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	0	10	5,5	37645
415	415	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	3	2	3,5	39124
416	416	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	3	2	4,5	39368
417	417	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	3	2	5,5	39528
418	418	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	3	6	3,5	38566
419	419	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	3	6	4,5	39042
420	420	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	3	6	5,5	39231
421	421	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	3	10	3,5	38374
422	422	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	3	10	4,5	38883
423	423	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	3	10	5,5	39173
424	424	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	6	2	3,5	39446
425	425	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	6	2	4,5	39593
426	426	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	6	2	5,5	39663
427	427	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	6	6	3,5	39076
428	428	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	6	6	4,5	39341

429	429	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	6	6	5,5	39474
430	430	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	6	10	3,5	38977
431	431	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	6	10	4,5	39237
432	432	1	2	MBRP	WEIB(2,400)	6	10	5,5	39424
433	433	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	2	3,5	37742
434	434	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	2	4,5	38403
435	435	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	2	5,5	38767
436	436	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	6	3,5	36201
437	437	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	6	4,5	37251
438	438	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	6	5,5	37878
439	439	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	10	3,5	35781
440	440	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	10	4,5	36899
441	441	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	0	10	5,5	37658
442	442	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	2	3,5	39089
443	443	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	2	4,5	39378
444	444	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	2	5,5	39538
445	445	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	6	3,5	38567
446	446	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	6	4,5	39010
447	447	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	6	5,5	39225
448	448	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	10	3,5	38404
449	449	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	10	4,5	38880
450	450	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	3	10	5,5	39169
451	451	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	2	3,5	39361
452	452	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	2	4,5	39551
453	453	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	2	5,5	39639
454	454	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	6	3,5	39038
455	455	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	6	4,5	39340
456	456	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	6	5,5	39473
457	457	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	10	3,5	38933
458	458	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	10	4,5	39262
459	459	1	2	MBRP	WEIB(3,5,400)	6	10	5,5	39414
460	460	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	0	2	3,5	37754
461	461	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	0	2	4,5	38406

462	462	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	0	2	5,5	38787
463	463	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	0	6	3,5	36170
464	464	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	0	6	4,5	37205
465	465	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	0	6	5,5	37889
466	466	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	0	10	3,5	35761
467	467	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	0	10	4,5	36894
468	468	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	0	10	5,5	37642
469	469	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	3	2	3,5	39120
470	470	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	3	2	4,5	39349
471	471	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	3	2	5,5	39504
472	472	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	3	6	3,5	38620
473	473	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	3	6	4,5	38982
474	474	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	3	6	5,5	39249
475	475	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	3	10	3,5	38417
476	476	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	3	10	4,5	38902
477	477	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	3	10	5,5	39164
478	478	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	2	3,5	39392
479	479	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	2	4,5	39544
480	480	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	2	5,5	39617
481	481	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	6	3,5	39005
482	482	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	6	4,5	39325
483	483	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	6	5,5	39459
484	484	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	10	3,5	38943
485	485	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	10	4,5	39283
486	486	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	10	5,5	39440
471	471	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	3	2	5,5	39504
472	472	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	3	6	3,5	38620
473	473	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	3	6	4,5	38982
474	474	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	3	6	5,5	39249
475	475	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	3	10	3,5	38417
476	476	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	3	10	4,5	38902
477	477	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	3	10	5,5	39164
478	478	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	2	3,5	39392

479	479	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	2	4,5	39544
480	480	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	2	5,5	39617
481	481	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	6	3,5	39005
482	482	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	6	4,5	39325
483	483	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	6	5,5	39459
484	484	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	10	3,5	38943
485	485	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	10	4,5	39283
486	486	1	2	MBRP	WEIB(5,400)	6	10	5,5	39440

Légende :

1. **S** : Stratégies de maintenance,
2. **D** : Loi de distribution des **D**éfaillances,
3. **I** : Capacité de l'**I**nventaire,
4. **M** : Nombre de **M**achines en séries,
5. **P** : La cadence de la **P**roduction,
6. **Q** : La **Q**uantité produite

Annexe II
Rapport Minitab

ANOVA I

Diagrammes de valeurs résiduelles pour Quantité

Modèle linéaire général : Quantité en fonction de S; D; I; M; P

Facteur	Type	Niveaux	Valeurs
S	fixe	3	ARP; BRP; MBRP
D	aléatoire	3	WEIB(2,400); WEIB(3.5,400); WEIB(5,400)
I	fixe	3	0; 3; 6
M	fixe	3	2; 6; 10
P	aléatoire	3	3,5; 4,5; 5,5

Analyse de la variance pour Quantité, avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

Source	DL	SomCar séq	SomCar ajust	CM ajust	F	P
S	2	9058981	9058981	4529490	858,27	0,000 x
D	2	21257	21257	10629	1,74	0,391 x
S*D	4	14845	14845	3711	0,97	0,574 x
I	2	202816474	202816474	101408237	41,22	0,002 x
S*I	4	2124518	2124518	531130	93,10	0,000 x
D*I	4	16576	16576	4144	1,69	0,524 x
S*D*I	8	36713	36713	4589	0,83	0,589 x
M	2	36703306	36703306	18351653	45,78	0,002 x
S*M	4	1181192	1181192	295298	58,50	0,000 x
D*M	4	16775	16775	4194	1,58	0,529 x
S*D*M	8	41477	41477	5185	0,90	0,541 x
I*M	4	17152480	17152480	4288120	75,03	0,000 x
S*I*M	8	826540	826540	103318	18,25	0,000 x
D*I*M	8	28398	28398	3550	0,63	0,741 x
S*D*I*M	16	92051	92051	5753	9,50	0,000
P	2	30246561	30246561	15123281	5,40	0,055 x
S*P	4	7107	7107	1777	1,39	0,370 x
D*P	4	5863	5863	1466	**	
S*D*P	8	1682	1682	210	0,53	0,790 x
I*P	4	9825747	9825747	2456437	44,57	0,000 x
S*I*P	8	11871	11871	1484	5,35	0,157 x
D*I*P	8	2461	2461	308	1,24	0,534 x
S*D*I*P	16	5885	5885	368	0,61	0,855
M*P	4	1587603	1587603	396901	7,38	0,009 x
S*M*P	8	3968	3968	496	0,92	0,563 x
D*M*P	8	1531	1531	191	0,37	0,897 x
S*D*M*P	16	10119	10119	632	1,04	0,442
I*M*P	8	432696	432696	54087	136,76	0,000 x
S*I*M*P	16	8246	8246	515	0,85	0,625
D*I*M*P	16	7775	7775	486	0,80	0,673
Erreur	32	19387	19387	606		
Total	242	312310086				

x n'est pas un test F exact.

** Le dénominateur du test F est zéro.

S = 24,6137 R carré = 99,99 % R carré (ajust) = 99,95 %

Espérance mathématique des carrés moyens, en utilisant la somme des carrés

ajustée

Source	Espérance mathématique des carrés moyens pour chaque terme
1 S	(31) + 3,0000 (29) + 3,0000 (27) + 9,0000 (25) + 3,0000 (23) + 9,0000 (21) + 9,0000 (19) + 27,0000 (17) + 3,0000 (15) + 9,0000 (11) + 9,0000 (7) + 27,0000 (3) + Q[1; 5 ; 9 ; 13]
2 D	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (27) + 9,0000 (26) + 3,0000 (23) + 9,0000 (22) + 9,0000 (19) + 27,0000 (18) + 3,0000 (15) + 9,0000 (14) + 9,0000 (11) + 27,0000 (10) + 9,0000 (7) + 27,0000 (6) + 27,0000 (3) + 81,0000 (2)
3 S*D	(31) + 3,0000 (27) + 3,0000 (23) + 9,0000 (19) + 3,0000 (15) + 9,0000 (11) + 9,0000 (7) + 27,0000 (3)
4 I	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (29) + 9,0000 (28) + 3,0000 (23) + 9,0000 (22) + 9,0000 (21) + 27,0000 (20) + 3,0000 (15) + 9,0000 (14) + 9,0000 (7) + 27,0000 (6) + Q[4; 5 ; 12 ; 13]
5 S*I	(31) + 3,0000 (29) + 3,0000 (23) + 9,0000 (21) + 3,0000 (15) + 9,0000 (7) + Q[5; 13]
6 D*I	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (23) + 9,0000 (22) + 3,0000 (15) + 9,0000 (14) + 9,0000 (7) + 27,0000 (6)
7 S*D*I	(31) + 3,0000 (23) + 3,0000 (15) + 9,0000 (7)
8 M	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (29) + 9,0000 (28) + 3,0000 (27) + 9,0000 (26) + 9,0000 (25) + 27,0000 (24) + 3,0000 (15) + 9,0000 (14) + 9,0000 (11) + 27,0000 (10) + Q[8; 9 ; 12 ; 13]
9 S*M	(31) + 3,0000 (29) + 3,0000 (27) + 9,0000 (25) + 3,0000 (15) + 9,0000 (11) + Q[9; 13]
10 D*M	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (27) + 9,0000 (26) + 3,0000 (15) + 9,0000 (14) + 9,0000 (11) + 27,0000 (10)
11 S*D*M	(31) + 3,0000 (27) + 3,0000 (15) + 9,0000 (11)
12 I*M	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (29) + 9,0000 (28) + 3,0000 (15) + 9,0000 (14) + Q[12; 13]
13 S*I*M	(31) + 3,0000 (29) + 3,0000 (15) + Q[13]
14 D*I*M	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (15) + 9,0000 (14)
15 S*D*I*M	(31) + 3,0000 (15)
16 P	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (29) + 9,0000 (28) + 3,0000 (27) + 9,0000 (26) + 9,0000 (25) + 27,0000 (24) + 3,0000 (23) + 9,0000 (22) + 9,0000 (21) + 27,0000 (20) + 9,0000 (19) + 27,0000 (18) + 27,0000 (17) + 81,0000 (16)
17 S*P	(31) + 3,0000 (29) + 3,0000 (27) + 9,0000 (25) + 3,0000 (23) + 9,0000 (21) + 9,0000 (19) + 27,0000 (17)
18 D*P	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (27) + 9,0000 (26) + 3,0000 (23) + 9,0000 (22) + 9,0000 (19) + 27,0000 (18)
19 S*D*P	(31) + 3,0000 (27) + 3,0000 (23) + 9,0000 (19)
20 I*P	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (29) + 9,0000 (28) + 3,0000 (23) + 9,0000 (22) + 9,0000 (21) + 27,0000 (20)
21 S*I*P	(31) + 3,0000 (29) + 3,0000 (23) + 9,0000 (21)
22 D*I*P	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (23) + 9,0000 (22)
23 S*D*I*P	(31) + 3,0000 (23)
24 M*P	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (29) + 9,0000 (28) + 3,0000 (27) + 9,0000 (26) + 9,0000 (25) + 27,0000 (24)
25 S*M*P	(31) + 3,0000 (29) + 3,0000 (27) + 9,0000 (25)
26 D*M*P	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (27) + 9,0000 (26)
27 S*D*M*P	(31) + 3,0000 (27)
28 I*M*P	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (29) + 9,0000 (28)
29 S*I*M*P	(31) + 3,0000 (29)
30 D*I*M*P	(31) + 3,0000 (30)
31 Erreur	(31)

Termes d'erreur pour les tests, en utilisant la somme des carrés ajustée

Source	Erreur	- DL	Erreur - CM	Synthèse du carré moyen de l'erreur
--------	--------	------	-------------	-------------------------------------

1	S	6,57	5277	(3) + (17) - (19)
2	D	1,67	6116	(3) + (6) - (7) + (10) - (11) - (14) + (15) + (18) - (19) - (22) + (23) - (26) + (27) + (30) - (31)
3	S*D	1,81	3836	(7) + (11) - (15) + (19) - (23) - (27) + (31)
4	I	4,01	2460273	(6) + (20) - (22)
5	S*I	11,16	5705	(7) + (21) - (23)
6	D*I	0,95	2445	(7) + (14) - (15) + (22) - (23) - (30) + (31)
7	S*D*I	14,56	5515	(15) + (23) - (31)
8	M	4,08	400903	(10) + (24) - (26)
9	S*M	7,46	5048	(11) + (25) - (27)
10	D*M	1,00	2660	(11) + (14) - (15) + (26) - (27) - (30) + (31)
11	S*D*M	15,87	5780	(15) + (27) - (31)
12	I*M	8,89	57151	(14) + (28) - (30)
13	S*I*M	15,29	5663	(15) + (29) - (31)
14	D*I*M	15,15	5633	(15) + (30) - (31)
15	S*D*I*M	32,00	606	(31)
16	P	5,07	2801199	(17) + (18) - (19) + (20) - (21) - (22) + (23) + (24) - (25) - (26) + (27) - (28) + (29) + (30) - (31)
17	S*P	4,39	1280	(19) + (21) - (23) + (25) - (27) - (29) + (31)
18	D*P	0,36	*	(19) + (22) - (23) + (26) - (27) - (30) + (31)
19	S*D*P	3,46	394	(23) + (27) - (31)
20	I*P	8,30	55115	(21) + (22) - (23) + (28) - (29) - (30) + (31)
21	S*I*P	2,11	277	(23) + (29) - (31)
22	D*I*P	1,77	248	(23) + (30) - (31)
23	S*D*I*P	32,00	606	(31)
24	M*P	7,90	53746	(25) + (26) - (27) + (28) - (29) - (30) + (31)
25	S*M*P	5,54	542	(27) + (29) - (31)
26	D*M*P	5,13	513	(27) + (30) - (31)
27	S*D*M*P	32,00	606	(31)
28	I*M*P	3,65	395	(29) + (30) - (31)
29	S*I*M*P	32,00	606	(31)
30	D*I*M*P	32,00	606	(31)

Composantes de la variance, avec la somme des carrés ajustée

Source	Valeur estimée
D	56
S*D	-5
D*I	63
S*D*I	-103
D*M	57
S*D*M	-66
D*I*M	-232
S*D*I*M	1716
P	152124
S*P	18
D*P	61
S*D*P	-20
I*P	88938
S*I*P	134
D*I*P	7
S*D*I*P	-79
M*P	12709

S*M*P	-5
D*M*P	-36
S*D*M*P	9
I*M*P	5966
S*I*M*P	-30
D*I*M*P	-40
Erreur	606

Diagrammes de valeurs résiduelles pour Quantité

Graphique des effets principaux pour Quantité

Diagramme des interactions pour Quantité

Modèle linéaire général : Quantité en fonction de S; D; I; M; P

Facteur	Type	Niveaux	Valeurs
S	fixe	3	ARP; BRP; MBRP
D	aléatoire	3	WEIB(2,400); WEIB(3.5,400); WEIB(5,400)
I	fixe	3	0; 3; 6
M	fixe	3	2; 6; 10
P	aléatoire	3	3,5; 4,5; 5,5

Analyse de la variance pour Quantité, avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

Source	DL	SomCar séq	SomCar ajust	CM ajust	F	P
S	2	9058981	9058981	4529490	858,27	0,000 x
D	2	21257	21257	10629	1,74	0,391 x
S*D	4	14845	14845	3711	0,97	0,574 x
I	2	202816474	202816474	101408237	41,22	0,002 x
S*I	4	2124518	2124518	531130	93,10	0,000 x
D*I	4	16576	16576	4144	1,69	0,524 x
S*D*I	8	36713	36713	4589	0,83	0,589 x
M	2	36703306	36703306	18351653	45,78	0,002 x
S*M	4	1181192	1181192	295298	58,50	0,000 x
D*M	4	16775	16775	4194	1,58	0,529 x
S*D*M	8	41477	41477	5185	0,90	0,541 x
I*M	4	17152480	17152480	4288120	75,03	0,000 x
S*I*M	8	826540	826540	103318	18,25	0,000 x
D*I*M	8	28398	28398	3550	0,63	0,741 x
S*D*I*M	16	92051	92051	5753	9,50	0,000
P	2	30246561	30246561	15123281	5,40	0,055 x
S*P	4	7107	7107	1777	1,39	0,370 x
D*P	4	5863	5863	1466	**	
S*D*P	8	1682	1682	210	0,53	0,790 x
I*P	4	9825747	9825747	2456437	44,57	0,000 x
S*I*P	8	11871	11871	1484	5,35	0,157 x
D*I*P	8	2461	2461	308	1,24	0,534 x
S*D*I*P	16	5885	5885	368	0,61	0,855
M*P	4	1587603	1587603	396901	7,38	0,009 x
S*M*P	8	3968	3968	496	0,92	0,563 x
D*M*P	8	1531	1531	191	0,37	0,897 x
S*D*M*P	16	10119	10119	632	1,04	0,442

I*M*P	8	432696	432696	54087	136,76	0,000 x
S*I*M*P	16	8246	8246	515	0,85	0,625
D*I*M*P	16	7775	7775	486	0,80	0,673
Erreur	32	19387	19387	606		
Total	242	312310086				

x n'est pas un test F exact.

** Le dénominateur du test F est zéro.

S = 24,6137 R carré = 99,99 % R carré (ajust) = 99,95 %

Espérance mathématique des carrés moyens, en utilisant la somme des carrés ajustée

Source	Espérance mathématique des carrés moyens pour chaque terme
1 S	(31) + 3,0000 (29) + 3,0000 (27) + 9,0000 (25) + 3,0000 (23) + 9,0000 (21) + 9,0000 (19) + 27,0000 (17) + 3,0000 (15) + 9,0000 (11) + 9,0000 (7) + 27,0000 (3) + Q[1; 5 ; 9 ; 13]
2 D	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (27) + 9,0000 (26) + 3,0000 (23) + 9,0000 (22) + 9,0000 (19) + 27,0000 (18) + 3,0000 (15) + 9,0000 (14) + 9,0000 (11) + 27,0000 (10) + 9,0000 (7) + 27,0000 (6) + 27,0000 (3) + 81,0000 (2)
3 S*D	(31) + 3,0000 (27) + 3,0000 (23) + 9,0000 (19) + 3,0000 (15) + 9,0000 (11) + 9,0000 (7) + 27,0000 (3)
4 I	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (29) + 9,0000 (28) + 3,0000 (23) + 9,0000 (22) + 9,0000 (21) + 27,0000 (20) + 3,0000 (15) + 9,0000 (14) + 9,0000 (7) + 27,0000 (6) + Q[4; 5 ; 12 ; 13]
5 S*I	(31) + 3,0000 (29) + 3,0000 (23) + 9,0000 (21) + 3,0000 (15) + 9,0000 (7) + Q[5; 13]
6 D*I	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (23) + 9,0000 (22) + 3,0000 (15) + 9,0000 (14) + 9,0000 (7) + 27,0000 (6)
7 S*D*I	(31) + 3,0000 (23) + 3,0000 (15) + 9,0000 (7)
8 M	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (29) + 9,0000 (28) + 3,0000 (27) + 9,0000 (26) + 9,0000 (25) + 27,0000 (24) + 3,0000 (15) + 9,0000 (14) + 9,0000 (11) + 27,0000 (10) + Q[8; 9 ; 12 ; 13]
9 S*M	(31) + 3,0000 (29) + 3,0000 (27) + 9,0000 (25) + 3,0000 (15) + 9,0000 (11) + Q[9; 13]
10 D*M	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (27) + 9,0000 (26) + 3,0000 (15) + 9,0000 (14) + 9,0000 (11) + 27,0000 (10)
11 S*D*M	(31) + 3,0000 (27) + 3,0000 (15) + 9,0000 (11)
12 I*M	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (29) + 9,0000 (28) + 3,0000 (15) + 9,0000 (14) + Q[12; 13]
13 S*I*M	(31) + 3,0000 (29) + 3,0000 (15) + Q[13]
14 D*I*M	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (15) + 9,0000 (14)
15 S*D*I*M	(31) + 3,0000 (15)
16 P	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (29) + 9,0000 (28) + 3,0000 (27) + 9,0000 (26) + 9,0000 (25) + 27,0000 (24) + 3,0000 (23) + 9,0000 (22) + 9,0000 (21) + 27,0000 (20) + 9,0000 (19) + 27,0000 (18) + 27,0000 (17) + 81,0000 (16)
17 S*P	(31) + 3,0000 (29) + 3,0000 (27) + 9,0000 (25) + 3,0000 (23) + 9,0000 (21) + 9,0000 (19) + 27,0000 (17)
18 D*P	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (27) + 9,0000 (26) + 3,0000 (23) + 9,0000 (22) + 9,0000 (19) + 27,0000 (18)
19 S*D*P	(31) + 3,0000 (27) + 3,0000 (23) + 9,0000 (19)
20 I*P	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (29) + 9,0000 (28) + 3,0000 (23) + 9,0000 (22) + 9,0000 (21) + 27,0000 (20)
21 S*I*P	(31) + 3,0000 (29) + 3,0000 (23) + 9,0000 (21)
22 D*I*P	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (23) + 9,0000 (22)
23 S*D*I*P	(31) + 3,0000 (23)
24 M*P	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (29) + 9,0000 (28) + 3,0000 (27) +

		9,0000 (26) + 9,0000 (25) + 27,0000 (24)
25	S*M*P	(31) + 3,0000 (29) + 3,0000 (27) + 9,0000 (25)
26	D*M*P	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (27) + 9,0000 (26)
27	S*D*M*P	(31) + 3,0000 (27)
28	I*M*P	(31) + 3,0000 (30) + 3,0000 (29) + 9,0000 (28)
29	S*I*M*P	(31) + 3,0000 (29)
30	D*I*M*P	(31) + 3,0000 (30)
31	Erreur	(31)

Termes d'erreur pour les tests, en utilisant la somme des carrés ajustée

		Erreur		
Source	- DL	Erreur - CM	Synthèse du carré moyen de l'erreur	
1 S	6,57	5277	(3) + (17) - (19)	
2 D	1,67	6116	(3) + (6) - (7) + (10) - (11) - (14) + (15) + (18) - (19) - (22) + (23) - (26) + (27) + (30) - (31)	
3 S*D	1,81	3836	(7) + (11) - (15) + (19) - (23) - (27) + (31)	
4 I	4,01	2460273	(6) + (20) - (22)	
5 S*I	11,16	5705	(7) + (21) - (23)	
6 D*I	0,95	2445	(7) + (14) - (15) + (22) - (23) - (30) + (31)	
7 S*D*I	14,56	5515	(15) + (23) - (31)	
8 M	4,08	400903	(10) + (24) - (26)	
9 S*M	7,46	5048	(11) + (25) - (27)	
10 D*M	1,00	2660	(11) + (14) - (15) + (26) - (27) - (30) + (31)	
11 S*D*M	15,87	5780	(15) + (27) - (31)	
12 I*M	8,89	57151	(14) + (28) - (30)	
13 S*I*M	15,29	5663	(15) + (29) - (31)	
14 D*I*M	15,15	5633	(15) + (30) - (31)	
15 S*D*I*M	32,00	606	(31)	
16 P	5,07	2801199	(17) + (18) - (19) + (20) - (21) - (22) + (23) + (24) - (25) - (26) + (27) - (28) + (29) + (30) - (31)	
17 S*P	4,39	1280	(19) + (21) - (23) + (25) - (27) - (29) + (31)	
18 D*P	0,36	*	(19) + (22) - (23) + (26) - (27) - (30) + (31)	
19 S*D*P	3,46	394	(23) + (27) - (31)	
20 I*P	8,30	55115	(21) + (22) - (23) + (28) - (29) - (30) + (31)	
21 S*I*P	2,11	277	(23) + (29) - (31)	
22 D*I*P	1,77	248	(23) + (30) - (31)	
23 S*D*I*P	32,00	606	(31)	
24 M*P	7,90	53746	(25) + (26) - (27) + (28) - (29) - (30) + (31)	
25 S*M*P	5,54	542	(27) + (29) - (31)	
26 D*M*P	5,13	513	(27) + (30) - (31)	
27 S*D*M*P	32,00	606	(31)	
28 I*M*P	3,65	395	(29) + (30) - (31)	
29 S*I*M*P	32,00	606	(31)	
30 D*I*M*P	32,00	606	(31)	

Composantes de la variance, avec la somme des carrés ajustée

Source	Valeur estimée
D	56
S*D	-5
D*I	63

S*D*I	-103
D*M	57
S*D*M	-66
D*I*M	-232
S*D*I*M	1716
P	152124
S*P	18
D*P	61
S*D*P	-20
I*P	88938
S*I*P	134
D*I*P	7
S*D*I*P	-79
M*P	12709
S*M*P	-5
D*M*P	-36
S*D*M*P	9
I*M*P	5966
S*I*M*P	-30
D*I*M*P	-40
Erreur	606

Diagrammes de valeurs résiduelles pour Quantité

Graphique des effets principaux pour Quantité

Diagramme des interactions pour Quantité

2010-04-09 22:13:47

Bienvenue dans Minitab, appuyez sur F1 pour obtenir de l'aide.
Récupération du projet du fichier 'X:\PLAN FACTORIEL.MPJ'

2010-04-10 19:43:06

Bienvenue dans Minitab, appuyez sur F1 pour obtenir de l'aide.
Récupération du projet du fichier 'X:\PLAN FACTORIEL.MPJ'

2010-04-10 19:53:40

Bienvenue dans Minitab, appuyez sur F1 pour obtenir de l'aide.
Récupération du projet du fichier 'X:\PLAN FACTORIEL.MPJ'

2010-04-11 11:04:41

Bienvenue dans Minitab, appuyez sur F1 pour obtenir de l'aide.
Récupération du projet du fichier 'X:\PLAN FACTORIEL.MPJ'

2010-04-11 16:06:33

Bienvenue dans Minitab, appuyez sur F1 pour obtenir de l'aide.
Récupération du projet du fichier 'X:\PLAN FACTORIEL.MPJ'

2010-04-12 09:19:37

Bienvenue dans Minitab, appuyez sur F1 pour obtenir de l'aide.
Récupération du projet du fichier 'X:\PLAN FACTORIEL.MPJ'

Résultats pour : Feuille de travail 3

ANOVA : Q en fonction de S; D; I; M; P

Facteur	Type	Niveaux	Valeurs
S	fixe	3	ARP; BRP; MBRP
D	aléatoire	3	WEIB(400,2); WEIB(400,3,5); WEIB(400,5)
I	fixe	3	0; 3; 6
M	fixe	3	2; 6; 10
P	aléatoire	3	3,5; 4,5; 5,5

Analyse de la variance pour Q

Source	DL	Somme des carrés	CM	F	P
S	2	17112479	8556239	548,35	0,018 x
D	2	18868	9434	0,55	0,763 x
S*D	4	72967	18242	0,73	0,631 x
I	2	70436999	35218500	42,56	0,002 x
S*I	4	1792994	448248	19,67	0,005 x
D*I	4	79618	19904	0,92	0,564 x
S*D*I	8	173438	21680	1,35	0,363 x
M	2	401249901	200624950	39,57	0,002 x
S*M	4	2956474	739119	34,97	0,004 x
D*M	4	67014	16754	1,08	0,574 x
S*D*M	8	154667	19333	1,05	0,480 x
I*M	4	32635962	8158990	62,20	0,000 x
S*I*M	8	941939	117742	6,67	0,011 x
D*I*M	8	124775	15597	0,96	0,533 x
S*D*I*M	16	291638	18227	0,94	0,528
P	2	60515258	30257629	5,25	0,059 x
S*P	4	69083	17271	0,74	0,632 x
D*P	4	81065	20266	1,04	0,543 x
S*D*P	8	159269	19909	1,13	0,442 x
I*P	4	3302413	825603	6,10	0,016 x
S*I*P	8	147630	18454	1,10	0,460 x
D*I*P	8	144288	18036	1,17	0,435 x
S*D*I*P	16	277427	17339	0,89	0,580
M*P	4	20280656	5070164	37,66	0,000 x
S*M*P	8	172222	21528	1,12	0,439 x
D*M*P	8	133227	16653	0,94	0,541 x
S*D*M*P	16	315601	19725	1,01	0,443
I*M*P	8	1064778	133097	7,86	0,008 x
S*I*M*P	16	302201	18888	0,97	0,490
D*I*M*P	16	280265	17517	0,90	0,570
Erreur	275	5353323	19467		
Total	485	620708437			

x n'est pas un test F exact.

S = 139,523 R carré = 99,14 % R carré (ajust) = 98,48 %

Diagrammes de valeurs résiduelles pour Q

2010-04-12 14:15:13

Bienvenue dans Minitab, appuyez sur F1 pour obtenir de l'aide.
Récupération du projet du fichier 'X:\PLAN FACTORIEL.MPJ'

Résultats pour : Feuille de travail 3

ANOVA : Q en fonction de S; D; I; M; P

Facteur	Type	Niveaux	Valeurs
S	fixe	3	ARP; BRP; MBRP
D	aléatoire	3	WEIB(400,2); WEIB(400,3,5); WEIB(400,5)
I	fixe	3	0; 3; 6
M	fixe	3	2; 6; 10
P	aléatoire	3	3,5; 4,5; 5,5

Analyse de la variance pour Q

Source	DL	Somme des carrés	CM	F	P
S	2	17112479	8556239	548,35	0,018 x
D	2	18868	9434	0,55	0,763 x
S*D	4	72967	18242	0,73	0,631 x
I	2	70436999	35218500	42,56	0,002 x
S*I	4	1792994	448248	19,67	0,005 x
D*I	4	79618	19904	0,92	0,564 x
S*D*I	8	173438	21680	1,35	0,363 x
M	2	401249901	200624950	39,57	0,002 x
S*M	4	2956474	739119	34,97	0,004 x
D*M	4	67014	16754	1,08	0,574 x
S*D*M	8	154667	19333	1,05	0,480 x
I*M	4	32635962	8158990	62,20	0,000 x
S*I*M	8	941939	117742	6,67	0,011 x
D*I*M	8	124775	15597	0,96	0,533 x
S*D*I*M	16	291638	18227	0,94	0,528
P	2	60515258	30257629	5,25	0,059 x
S*P	4	69083	17271	0,74	0,632 x
D*P	4	81065	20266	1,04	0,543 x
S*D*P	8	159269	19909	1,13	0,442 x
I*P	4	3302413	825603	6,10	0,016 x
S*I*P	8	147630	18454	1,10	0,460 x
D*I*P	8	144288	18036	1,17	0,435 x
S*D*I*P	16	277427	17339	0,89	0,580
M*P	4	20280656	5070164	37,66	0,000 x
S*M*P	8	172222	21528	1,12	0,439 x
D*M*P	8	133227	16653	0,94	0,541 x
S*D*M*P	16	315601	19725	1,01	0,443
I*M*P	8	1064778	133097	7,86	0,008 x
S*I*M*P	16	302201	18888	0,97	0,490
D*I*M*P	16	280265	17517	0,90	0,570
Erreur	275	5353323	19467		

Total 485 620708437

x n'est pas un test F exact.

S = 139,523 R carré = 99,14 % R carré (ajust) = 98,48 %

	Source	Composante de variance	Terme d'erreur	Espérance mathématique des carrés moyens pour chaque terme (avec modèle non restreint)
1	S		*	(31) + 6 (29) + 6 (27) + 18 (25) + 6 (23) + 18 (21) + 18 (19) + 54 (17) + 6 (15) + 18 (11) + 18 (7) + 54 (3) + Q[1;5;9;13]
2	D	-49	*	(31) + 6 (30) + 6 (27) + 18 (26) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (19) + 54 (18) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (11) + 54 (10) + 18 (7) + 54 (6) + 54 (3) + 162 (2)
3	S*D	-127	*	(31) + 6 (27) + 6 (23) + 18 (19) + 6 (15) + 18 (11) + 18 (7) + 54 (3)
4	I		*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (21) + 54 (20) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (7) + 54 (6) + Q[4;5;12;13]
5	S*I		*	(31) + 6 (29) + 6 (23) + 18 (21) + 6 (15) + 18 (7) + Q[5;13]
6	D*I	-33	*	(31) + 6 (30) + 6 (23) + 18 (22) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (7) + 54 (6)
7	S*D*I	310	*	(31) + 6 (23) + 6 (15) + 18 (7)
8	M		*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (27) + 18 (26) + 18 (25) + 54 (24) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (11) + 54 (10) + Q[8;9;12;13]
9	S*M		*	(31) + 6 (29) + 6 (27) + 18 (25) + 6 (15) + 18 (11) + Q[9;13]
10	D*M	22	*	(31) + 6 (30) + 6 (27) + 18 (26) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (11) + 54 (10)
11	S*D*M	47	*	(31) + 6 (27) + 6 (15) + 18 (11)
12	I*M		*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (15) + 18 (14) + Q[12;13]
13	S*I*M		*	(31) + 6 (29) + 6 (15) + Q[13]
14	D*I*M	-38	*	(31) + 6 (30) + 6 (15) + 18 (14)
15	S*D*I*M	-207	31	(31) + 6 (15)
16	P	151222	*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (27) + 18 (26) + 18 (25) + 54 (24) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (21) + 54 (20) + 18 (19) + 54 (18) + 54 (17) + 162 (16)
17	S*P	-114	*	(31) + 6 (29) + 6 (27) + 18 (25) + 6 (23) + 18 (21) + 18 (19) + 54 (17)
18	D*P	14	*	(31) + 6 (30) + 6 (27) + 18 (26) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (19) + 54 (18)
19	S*D*P	128	*	(31) + 6 (27) + 6 (23) + 18 (19)
20	I*P	12783	*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (21) + 54 (20)
21	S*I*P	94	*	(31) + 6 (29) + 6 (23) + 18 (21)
22	D*I*P	147	*	(31) + 6 (30) + 6 (23) + 18 (22)
23	S*D*I*P	-355	31	(31) + 6 (23)
24	M*P	91399	*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (27) + 18 (26) + 18 (25) + 54 (24)
25	S*M*P	132	*	(31) + 6 (29) + 6 (27) + 18 (25)
26	D*M*P	-62	*	(31) + 6 (30) + 6 (27) + 18 (26)
27	S*D*M*P	43	31	(31) + 6 (27)
28	I*M*P	6453	*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28)
29	S*I*M*P	-97	31	(31) + 6 (29)
30	D*I*M*P	-325	31	(31) + 6 (30)

31 Erreur 19467 (31)

* Test synthétisé.

Termes d'erreur pour les tests synthétisés

Source	Erreur - DL	Erreur - CM	Synthèse du carré moyen de l'erreur
1 S	1,17	15604	(3) + (17) - (19)
2 D	0,43	17300	(3) + (6) - (7) + (10) - (11) - (14) + (15) + (18) - (19) - (22) + (23) - (26) + (27) + (30) - (31)
3 S*D	2,86	25097	(7) + (11) - (15) + (19) - (23) - (27) + (31)
4 I	4,01	827472	(6) + (20) - (22)
5 S*I	4,33	22794	(7) + (21) - (23)
6 D*I	2,48	21696	(7) + (14) - (15) + (22) - (23) - (30) + (31)
7 S*D*I	6,33	16100	(15) + (23) - (31)
8 M	4,00	5070264	(10) + (24) - (26)
9 S*M	3,46	21136	(11) + (25) - (27)
10 D*M	1,37	15581	(11) + (14) - (15) + (26) - (27) - (30) + (31)
11 S*D*M	7,36	18486	(15) + (27) - (31)
12 I*M	7,60	131178	(14) + (28) - (30)
13 S*I*M	7,01	17648	(15) + (29) - (31)
14 D*I*M	6,41	16277	(15) + (30) - (31)
16 P	5,03	5759629	(17) + (18) - (19) + (20) - (21) - (22) + (23) + (24) - (25) - (26) + (27) - (28) + (29) + (30) - (31)
17 S*P	2,53	23405	(19) + (21) - (23) + (25) - (27) - (29) + (31)
18 D*P	2,01	19484	(19) + (22) - (23) + (26) - (27) - (30) + (31)
19 S*D*P	6,96	17598	(23) + (27) - (31)
20 I*P	7,76	135310	(21) + (22) - (23) + (28) - (29) - (30) + (31)
21 S*I*P	6,61	16760	(23) + (29) - (31)
22 D*I*P	6,02	15389	(23) + (30) - (31)
24 M*P	7,63	134616	(25) + (26) - (27) + (28) - (29) - (30) + (31)
25 S*M*P	7,64	19146	(27) + (29) - (31)
26 D*M*P	7,04	17775	(27) + (30) - (31)
28 I*M*P	6,69	16938	(29) + (30) - (31)

Diagrammes de valeurs résiduelles pour Q

Graphique des effets principaux pour Q

Diagramme des interactions pour Q

ANOVA : Q en fonction de S; D; I; M; P

Facteur	Type	Niveaux	Valeurs
S	fixe	3	ARP; BRP; MBRP
D	aléatoire	3	WEIB(400,2); WEIB(400,3,5); WEIB(400,5)
I	fixe	3	0; 3; 6
M	fixe	3	2; 6; 10
P	aléatoire	3	3,5; 4,5; 5,5

Analyse de la variance pour Q

Source	DL	Somme des carrés	CM	F	P
S	2	17112479	8556239	548,35	0,018 x
D	2	18868	9434	0,55	0,763 x
S*D	4	72967	18242	0,73	0,631 x
I	2	70436999	35218500	42,56	0,002 x
S*I	4	1792994	448248	19,67	0,005 x
D*I	4	79618	19904	0,92	0,564 x
S*D*I	8	173438	21680	1,35	0,363 x
M	2	401249901	200624950	39,57	0,002 x
S*M	4	2956474	739119	34,97	0,004 x
D*M	4	67014	16754	1,08	0,574 x
S*D*M	8	154667	19333	1,05	0,480 x
I*M	4	32635962	8158990	62,20	0,000 x
S*I*M	8	941939	117742	6,67	0,011 x
D*I*M	8	124775	15597	0,96	0,533 x
S*D*I*M	16	291638	18227	0,94	0,528
P	2	60515258	30257629	5,25	0,059 x
S*P	4	69083	17271	0,74	0,632 x
D*P	4	81065	20266	1,04	0,543 x
S*D*P	8	159269	19909	1,13	0,442 x
I*P	4	3302413	825603	6,10	0,016 x
S*I*P	8	147630	18454	1,10	0,460 x
D*I*P	8	144288	18036	1,17	0,435 x
S*D*I*P	16	277427	17339	0,89	0,580
M*P	4	20280656	5070164	37,66	0,000 x
S*M*P	8	172222	21528	1,12	0,439 x
D*M*P	8	133227	16653	0,94	0,541 x
S*D*M*P	16	315601	19725	1,01	0,443
I*M*P	8	1064778	133097	7,86	0,008 x
S*I*M*P	16	302201	18888	0,97	0,490
D*I*M*P	16	280265	17517	0,90	0,570
Erreur	275	5353323	19467		
Total	485	620708437			

x n'est pas un test F exact.

S = 139,523 R carré = 99,14 % R carré (ajust) = 98,48 %

Source	Composante de variance	Terme d'erreur	Espérance mathématique des carrés moyens pour chaque terme (avec modèle non restreint)
1 S		*	(31) + 6 (29) + 6 (27) + 18 (25) + 6 (23) + 18 (21) + 18 (19) + 54 (17) + 6 (15) + 18 (11) + 18 (7) + 54 (3) + Q[1;5;9;13]
2 D	-49	*	(31) + 6 (30) + 6 (27) + 18 (26) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (19) + 54 (18) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (11) + 54 (10) + 18 (7) + 54 (6) + 54 (3) + 162 (2)
3 S*D	-127	*	(31) + 6 (27) + 6 (23) + 18 (19) + 6 (15) + 18 (11) + 18 (7) + 54 (3)
4 I		*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (21) + 54 (20) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (7) + 54 (6) + Q[4;5;12;13]
5 S*I		*	(31) + 6 (29) + 6 (23) + 18 (21) + 6 (15) + 18 (7) + Q[5;13]
6 D*I	-33	*	(31) + 6 (30) + 6 (23) + 18 (22) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (7) + 54 (6)

7	S*D*I	310	*	(31) + 6 (23) + 6 (15) + 18 (7)
8	M		*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (27) + 18 (26) + 18 (25) + 54 (24) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (11) + 54 (10) + Q[8;9;12;13]
9	S*M		*	(31) + 6 (29) + 6 (27) + 18 (25) + 6 (15) + 18 (11) + Q[9;13]
10	D*M	22	*	(31) + 6 (30) + 6 (27) + 18 (26) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (11) + 54 (10)
11	S*D*M	47	*	(31) + 6 (27) + 6 (15) + 18 (11)
12	I*M		*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (15) + 18 (14) + Q[12;13]
13	S*I*M		*	(31) + 6 (29) + 6 (15) + Q[13]
14	D*I*M	-38	*	(31) + 6 (30) + 6 (15) + 18 (14)
15	S*D*I*M	-207	31	(31) + 6 (15)
16	P	151222	*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (27) + 18 (26) + 18 (25) + 54 (24) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (21) + 54 (20) + 18 (19) + 54 (18) + 54 (17) + 162 (16)
17	S*P	-114	*	(31) + 6 (29) + 6 (27) + 18 (25) + 6 (23) + 18 (21) + 18 (19) + 54 (17)
18	D*P	14	*	(31) + 6 (30) + 6 (27) + 18 (26) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (19) + 54 (18)
19	S*D*P	128	*	(31) + 6 (27) + 6 (23) + 18 (19)
20	I*P	12783	*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (21) + 54 (20)
21	S*I*P	94	*	(31) + 6 (29) + 6 (23) + 18 (21)
22	D*I*P	147	*	(31) + 6 (30) + 6 (23) + 18 (22)
23	S*D*I*P	-355	31	(31) + 6 (23)
24	M*P	91399	*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (27) + 18 (26) + 18 (25) + 54 (24)
25	S*M*P	132	*	(31) + 6 (29) + 6 (27) + 18 (25)
26	D*M*P	-62	*	(31) + 6 (30) + 6 (27) + 18 (26)
27	S*D*M*P	43	31	(31) + 6 (27)
28	I*M*P	6453	*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28)
29	S*I*M*P	-97	31	(31) + 6 (29)
30	D*I*M*P	-325	31	(31) + 6 (30)
31	Erreur	19467		(31)

* Test synthétisé.

Termes d'erreur pour les tests synthétisés

Source	Erreur - DL	Erreur - CM	Synthèse du carré moyen de l'erreur
1 S	1,17	15604	(3) + (17) - (19)
2 D	0,43	17300	(3) + (6) - (7) + (10) - (11) - (14) + (15) + (18) - (19) - (22) + (23) - (26) + (27) + (30) - (31)
3 S*D	2,86	25097	(7) + (11) - (15) + (19) - (23) - (27) + (31)
4 I	4,01	827472	(6) + (20) - (22)
5 S*I	4,33	22794	(7) + (21) - (23)
6 D*I	2,48	21696	(7) + (14) - (15) + (22) - (23) - (30) + (31)
7 S*D*I	6,33	16100	(15) + (23) - (31)
8 M	4,00	5070264	(10) + (24) - (26)
9 S*M	3,46	21136	(11) + (25) - (27)
10 D*M	1,37	15581	(11) + (14) - (15) + (26) - (27) - (30) + (31)
11 S*D*M	7,36	18486	(15) + (27) - (31)
12 I*M	7,60	131178	(14) + (28) - (30)
13 S*I*M	7,01	17648	(15) + (29) - (31)
14 D*I*M	6,41	16277	(15) + (30) - (31)

16 P	5,03	5759629	(17) + (18) - (19) + (20) - (21) - (22) + (23) + (24) - (25) - (26) + (27) - (28) + (29) + (30) - (31)
17 S*P	2,53	23405	(19) + (21) - (23) + (25) - (27) - (29) + (31)
18 D*P	2,01	19484	(19) + (22) - (23) + (26) - (27) - (30) + (31)
19 S*D*P	6,96	17598	(23) + (27) - (31)
20 I*P	7,76	135310	(21) + (22) - (23) + (28) - (29) - (30) + (31)
21 S*I*P	6,61	16760	(23) + (29) - (31)
22 D*I*P	6,02	15389	(23) + (30) - (31)
24 M*P	7,63	134616	(25) + (26) - (27) + (28) - (29) - (30) + (31)
25 S*M*P	7,64	19146	(27) + (29) - (31)
26 D*M*P	7,04	17775	(27) + (30) - (31)
28 I*M*P	6,69	16938	(29) + (30) - (31)

Diagrammes de valeurs résiduelles pour Q

Modèle linéaire général : Q en fonction de S; D; I; M; P

Facteur	Type	Niveaux	Valeurs
S	fixe	3	ARP; BRP; MBRP
D	aléatoire	3	WEIB(400,2); WEIB(400,3,5); WEIB(400,5)
I	fixe	3	0; 3; 6
M	fixe	3	2; 6; 10
P	aléatoire	3	3,5; 4,5; 5,5

Analyse de la variance pour Q, avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

Source	DL	SomCar séq	SomCar ajust	CM ajust	F	P
S	2	17112479	17112479	8556239	548,35	0,018 x
D	2	18868	18868	9434	0,55	0,763 x
S*D	4	72967	72967	18242	0,73	0,631 x
I	2	70436999	70436999	35218500	42,56	0,002 x
S*I	4	1792994	1792994	448248	19,67	0,005 x
D*I	4	79618	79618	19904	0,92	0,564 x
S*D*I	8	173438	173438	21680	1,35	0,363 x
M	2	401249901	401249901	200624950	39,57	0,002 x
S*M	4	2956474	2956474	739119	34,97	0,004 x
D*M	4	67014	67014	16754	1,08	0,574 x
S*D*M	8	154667	154667	19333	1,05	0,480 x
I*M	4	32635962	32635962	8158990	62,20	0,000 x
S*I*M	8	941939	941939	117742	6,67	0,011 x
D*I*M	8	124775	124775	15597	0,96	0,533 x
S*D*I*M	16	291638	291638	18227	0,94	0,528
P	2	60515258	60515258	30257629	5,25	0,059 x
S*P	4	69083	69083	17271	0,74	0,632 x
D*P	4	81065	81065	20266	1,04	0,543 x
S*D*P	8	159269	159269	19909	1,13	0,442 x
I*P	4	3302413	3302413	825603	6,10	0,016 x
S*I*P	8	147630	147630	18454	1,10	0,460 x
D*I*P	8	144288	144288	18036	1,17	0,435 x
S*D*I*P	16	277427	277427	17339	0,89	0,580
M*P	4	20280656	20280656	5070164	37,66	0,000 x
S*M*P	8	172222	172222	21528	1,12	0,439 x
D*M*P	8	133227	133227	16653	0,94	0,541 x
S*D*M*P	16	315601	315601	19725	1,01	0,443

I*M*P	8	1064778	1064778	133097	7,86	0,008 x
S*I*M*P	16	302201	302201	18888	0,97	0,490
D*I*M*P	16	280265	280265	17517	0,90	0,570
Erreur	275	5353323	5353323	19467		
Total	485	620708437				

x n'est pas un test F exact.

S = 139,523 R carré = 99,14 % R carré (ajust) = 98,48 %

Espérance mathématique des carrés moyens, en utilisant la somme des carrés ajustée

Source	Espérance mathématique des carrés moyens pour chaque terme
1 S	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (27) + 18,0000 (25) + 6,0000 (23) + 18,0000 (21) + 18,0000 (19) + 54,0000 (17) + 6,0000 (15) + 18,0000 (11) + 18,0000 (7) + 54,0000 (3) + Q[1; 5 ; 9 ; 13]
2 D	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (19) + 54,0000 (18) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (11) + 54,0000 (10) + 18,0000 (7) + 54,0000 (6) + 54,0000 (3) + 162,0000 (2)
3 S*D	(31) + 6,0000 (27) + 6,0000 (23) + 18,0000 (19) + 6,0000 (15) + 18,0000 (11) + 18,0000 (7) + 54,0000 (3)
4 I	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (21) + 54,0000 (20) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (7) + 54,0000 (6) + Q[4; 5 ; 12 ; 13]
5 S*I	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (23) + 18,0000 (21) + 6,0000 (15) + 18,0000 (7) + Q[5; 13]
6 D*I	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (7) + 54,0000 (6)
7 S*D*I	(31) + 6,0000 (23) + 6,0000 (15) + 18,0000 (7)
8 M	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 18,0000 (25) + 54,0000 (24) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (11) + 54,0000 (10) + Q[8; 9 ; 12 ; 13]
9 S*M	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (27) + 18,0000 (25) + 6,0000 (15) + 18,0000 (11) + Q[9; 13]
10 D*M	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (11) + 54,0000 (10)
11 S*D*M	(31) + 6,0000 (27) + 6,0000 (15) + 18,0000 (11)
12 I*M	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + Q[12; 13]
13 S*I*M	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (15) + Q[13]
14 D*I*M	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14)
15 S*D*I*M	(31) + 6,0000 (15)
16 P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 18,0000 (25) + 54,0000 (24) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (21) + 54,0000 (20) + 18,0000 (19) + 54,0000 (18) + 54,0000 (17) + 162,0000 (16)
17 S*P	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (27) + 18,0000 (25) + 6,0000 (23) + 18,0000 (21) + 18,0000 (19) + 54,0000 (17)
18 D*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (19) + 54,0000 (18)
19 S*D*P	(31) + 6,0000 (27) + 6,0000 (23) + 18,0000 (19)
20 I*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (21) + 54,0000 (20)
21 S*I*P	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (23) + 18,0000 (21)
22 D*I*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22)
23 S*D*I*P	(31) + 6,0000 (23)
24 M*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 18,0000 (25) + 54,0000 (24)

25	S*M*P	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (27) + 18,0000 (25)
26	D*M*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26)
27	S*D*M*P	(31) + 6,0000 (27)
28	I*M*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28)
29	S*I*M*P	(31) + 6,0000 (29)
30	D*I*M*P	(31) + 6,0000 (30)
31	Erreur	(31)

Termes d'erreur pour les tests, en utilisant la somme des carrés ajustée

		Erreur		Synthèse du carré moyen de l'erreur
	Source	- DL	Erreur - CM	
1	S	1,17	15604	(3) + (17) - (19)
2	D	0,43	17300	(3) + (6) - (7) + (10) - (11) - (14) + (15) + (18) - (19) - (22) + (23) - (26) + (27) + (30) - (31)
3	S*D	2,86	25097	(7) + (11) - (15) + (19) - (23) - (27) + (31)
4	I	4,01	827472	(6) + (20) - (22)
5	S*I	4,33	22794	(7) + (21) - (23)
6	D*I	2,48	21696	(7) + (14) - (15) + (22) - (23) - (30) + (31)
7	S*D*I	6,33	16100	(15) + (23) - (31)
8	M	4,00	5070264	(10) + (24) - (26)
9	S*M	3,46	21136	(11) + (25) - (27)
10	D*M	1,37	15581	(11) + (14) - (15) + (26) - (27) - (30) + (31)
11	S*D*M	7,36	18486	(15) + (27) - (31)
12	I*M	7,60	131178	(14) + (28) - (30)
13	S*I*M	7,01	17648	(15) + (29) - (31)
14	D*I*M	6,41	16277	(15) + (30) - (31)
15	S*D*I*M	275,00	19467	(31)
16	P	5,03	5759629	(17) + (18) - (19) + (20) - (21) - (22) + (23) + (24) - (25) - (26) + (27) - (28) + (29) + (30) - (31)
17	S*P	2,53	23405	(19) + (21) - (23) + (25) - (27) - (29) + (31)
18	D*P	2,01	19484	(19) + (22) - (23) + (26) - (27) - (30) + (31)
19	S*D*P	6,96	17598	(23) + (27) - (31)
20	I*P	7,76	135310	(21) + (22) - (23) + (28) - (29) - (30) + (31)
21	S*I*P	6,61	16760	(23) + (29) - (31)
22	D*I*P	6,02	15389	(23) + (30) - (31)
23	S*D*I*P	275,00	19467	(31)
24	M*P	7,63	134616	(25) + (26) - (27) + (28) - (29) - (30) + (31)
25	S*M*P	7,64	19146	(27) + (29) - (31)
26	D*M*P	7,04	17775	(27) + (30) - (31)
27	S*D*M*P	275,00	19467	(31)
28	I*M*P	6,69	16938	(29) + (30) - (31)
29	S*I*M*P	275,00	19467	(31)
30	D*I*M*P	275,00	19467	(31)

Composantes de la variance, avec la somme des carrés ajustée

Source	Valeur estimée
D	-49
S*D	-127
D*I	-33
S*D*I	310

D*M	22
S*D*M	47
D*I*M	-38
S*D*I*M	-207
P	151222
S*P	-114
D*P	14
S*D*P	128
I*P	12783
S*I*P	94
D*I*P	147
S*D*I*P	-355
M*P	91399
S*M*P	132
D*M*P	-62
S*D*M*P	43
I*M*P	6453
S*I*M*P	-97
D*I*M*P	-325
Erreur	19467

Diagrammes de valeurs résiduelles pour Q

Graphique des effets principaux pour Q

Diagramme des interactions pour Q

2010-04-14 10:38:53

Bienvenue dans Minitab, appuyez sur F1 pour obtenir de l'aide.
Récupération du projet du fichier 'X:\PLAN FACTORIEL.MPJ'

Résultats pour : Feuille de travail 3

ANOVA : Q en fonction de S; D; I; M; P

Facteur	Type	Niveaux	Valeurs
S	fixe	3	ARP; BRP; MBRP
D	aléatoire	3	WEIB(400,2); WEIB(400,3,5); WEIB(400,5)
I	fixe	3	0; 3; 6
M	fixe	3	2; 6; 10
P	aléatoire	3	3,5; 4,5; 5,5

Analyse de la variance pour Q

Source	DL	Somme des carrés	CM	F	P
S	2	17112479	8556239	548,35	0,018 x
D	2	18868	9434	0,55	0,763 x
S*D	4	72967	18242	0,73	0,631 x
I	2	70436999	35218500	42,56	0,002 x
S*I	4	1792994	448248	19,67	0,005 x
D*I	4	79618	19904	0,92	0,564 x
S*D*I	8	173438	21680	1,35	0,363 x

M	2	401249901	200624950	39,57	0,002	x
S*M	4	2956474	739119	34,97	0,004	x
D*M	4	67014	16754	1,08	0,574	x
S*D*M	8	154667	19333	1,05	0,480	x
I*M	4	32635962	8158990	62,20	0,000	x
S*I*M	8	941939	117742	6,67	0,011	x
D*I*M	8	124775	15597	0,96	0,533	x
S*D*I*M	16	291638	18227	0,94	0,528	
P	2	60515258	30257629	5,25	0,059	x
S*P	4	69083	17271	0,74	0,632	x
D*P	4	81065	20266	1,04	0,543	x
S*D*P	8	159269	19909	1,13	0,442	x
I*P	4	3302413	825603	6,10	0,016	x
S*I*P	8	147630	18454	1,10	0,460	x
D*I*P	8	144288	18036	1,17	0,435	x
S*D*I*P	16	277427	17339	0,89	0,580	
M*P	4	20280656	5070164	37,66	0,000	x
S*M*P	8	172222	21528	1,12	0,439	x
D*M*P	8	133227	16653	0,94	0,541	x
S*D*M*P	16	315601	19725	1,01	0,443	
I*M*P	8	1064778	133097	7,86	0,008	x
S*I*M*P	16	302201	18888	0,97	0,490	
D*I*M*P	16	280265	17517	0,90	0,570	
Erreur	275	5353323	19467			
Total	485	620708437				

x n'est pas un test F exact.

S = 139,523 R carré = 99,14 % R carré (ajust) = 98,48 %

	Source	Composante de variance	Terme d'erreur	Espérance mathématique des carrés moyens pour chaque terme (avec modèle non restreint)
1	S		*	(31) + 6 (29) + 6 (27) + 18 (25) + 6 (23) + 18 (21) + 18 (19) + 54 (17) + 6 (15) + 18 (11) + 18 (7) + 54 (3) + Q[1;5;9;13]
2	D	-49	*	(31) + 6 (30) + 6 (27) + 18 (26) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (19) + 54 (18) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (11) + 54 (10) + 18 (7) + 54 (6) + 54 (3) + 162 (2)
3	S*D	-127	*	(31) + 6 (27) + 6 (23) + 18 (19) + 6 (15) + 18 (11) + 18 (7) + 54 (3)
4	I		*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (21) + 54 (20) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (7) + 54 (6) + Q[4;5;12;13]
5	S*I		*	(31) + 6 (29) + 6 (23) + 18 (21) + 6 (15) + 18 (7) + Q[5;13]
6	D*I	-33	*	(31) + 6 (30) + 6 (23) + 18 (22) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (7) + 54 (6)
7	S*D*I	310	*	(31) + 6 (23) + 6 (15) + 18 (7)
8	M		*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (27) + 18 (26) + 18 (25) + 54 (24) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (11) + 54 (10) + Q[8;9;12;13]
9	S*M		*	(31) + 6 (29) + 6 (27) + 18 (25) + 6 (15) + 18 (11) + Q[9;13]
10	D*M	22	*	(31) + 6 (30) + 6 (27) + 18 (26) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (11) + 54 (10)
11	S*D*M	47	*	(31) + 6 (27) + 6 (15) + 18 (11)
12	I*M		*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (15) + 18 (14) + Q[12;13]
13	S*I*M		*	(31) + 6 (29) + 6 (15) + Q[13]

14	D*I*M	-38	*	(31) + 6 (30) + 6 (15) + 18 (14)
15	S*D*I*M	-207	31	(31) + 6 (15)
16	P	151222	*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (27) + 18 (26) + 18 (25) + 54 (24) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (21) + 54 (20) + 18 (19) + 54 (18) + 54 (17) + 162 (16)
17	S*P	-114	*	(31) + 6 (29) + 6 (27) + 18 (25) + 6 (23) + 18 (21) + 18 (19) + 54 (17)
18	D*P	14	*	(31) + 6 (30) + 6 (27) + 18 (26) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (19) + 54 (18)
19	S*D*P	128	*	(31) + 6 (27) + 6 (23) + 18 (19)
20	I*P	12783	*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (21) + 54 (20)
21	S*I*P	94	*	(31) + 6 (29) + 6 (23) + 18 (21)
22	D*I*P	147	*	(31) + 6 (30) + 6 (23) + 18 (22)
23	S*D*I*P	-355	31	(31) + 6 (23)
24	M*P	91399	*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (27) + 18 (26) + 18 (25) + 54 (24)
25	S*M*P	132	*	(31) + 6 (29) + 6 (27) + 18 (25)
26	D*M*P	-62	*	(31) + 6 (30) + 6 (27) + 18 (26)
27	S*D*M*P	43	31	(31) + 6 (27)
28	I*M*P	6453	*	(31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28)
29	S*I*M*P	-97	31	(31) + 6 (29)
30	D*I*M*P	-325	31	(31) + 6 (30)
31	Erreur	19467	(31)	

* Test synthétisé.

Termes d'erreur pour les tests synthétisés

Source	Erreur - DL	Erreur - CM	Synthèse du carré moyen de l'erreur
1 S	1,17	15604	(3) + (17) - (19)
2 D	0,43	17300	(3) + (6) - (7) + (10) - (11) - (14) + (15) + (18) - (19) - (22) + (23) - (26) + (27) + (30) - (31)
3 S*D	2,86	25097	(7) + (11) - (15) + (19) - (23) - (27) + (31)
4 I	4,01	827472	(6) + (20) - (22)
5 S*I	4,33	22794	(7) + (21) - (23)
6 D*I	2,48	21696	(7) + (14) - (15) + (22) - (23) - (30) + (31)
7 S*D*I	6,33	16100	(15) + (23) - (31)
8 M	4,00	5070264	(10) + (24) - (26)
9 S*M	3,46	21136	(11) + (25) - (27)
10 D*M	1,37	15581	(11) + (14) - (15) + (26) - (27) - (30) + (31)
11 S*D*M	7,36	18486	(15) + (27) - (31)
12 I*M	7,60	131178	(14) + (28) - (30)
13 S*I*M	7,01	17648	(15) + (29) - (31)
14 D*I*M	6,41	16277	(15) + (30) - (31)
16 P	5,03	5759629	(17) + (18) - (19) + (20) - (21) - (22) + (23) + (24) - (25) - (26) + (27) - (28) + (29) + (30) - (31)
17 S*P	2,53	23405	(19) + (21) - (23) + (25) - (27) - (29) + (31)
18 D*P	2,01	19484	(19) + (22) - (23) + (26) - (27) - (30) + (31)
19 S*D*P	6,96	17598	(23) + (27) - (31)
20 I*P	7,76	135310	(21) + (22) - (23) + (28) - (29) - (30) + (31)
21 S*I*P	6,61	16760	(23) + (29) - (31)
22 D*I*P	6,02	15389	(23) + (30) - (31)
24 M*P	7,63	134616	(25) + (26) - (27) + (28) - (29) - (30) + (31)
25 S*M*P	7,64	19146	(27) + (29) - (31)
26 D*M*P	7,04	17775	(27) + (30) - (31)

28 I*M*P 6,69 16938 (29) + (30) - (31)

Diagrammes de valeurs résiduelles pour Q

Modèle linéaire général : Q en fonction de S; D; I; M; P

Facteur	Type	Niveaux	Valeurs
S	fixe	3	ARP; BRP; MBRP
D	aléatoire	3	WEIB(400,2); WEIB(400,3,5); WEIB(400,5)
I	fixe	3	0; 3; 6
M	fixe	3	2; 6; 10
P	aléatoire	3	3,5; 4,5; 5,5

Analyse de la variance pour Q, avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

Source	DL	SomCar séq	SomCar ajust	CM ajust	F	P
S	2	17112479	17112479	8556239	548,35	0,018 x
D	2	18868	18868	9434	0,55	0,763 x
S*D	4	72967	72967	18242	0,73	0,631 x
I	2	70436999	70436999	35218500	42,56	0,002 x
S*I	4	1792994	1792994	448248	19,67	0,005 x
D*I	4	79618	79618	19904	0,92	0,564 x
S*D*I	8	173438	173438	21680	1,35	0,363 x
M	2	401249901	401249901	200624950	39,57	0,002 x
S*M	4	2956474	2956474	739119	34,97	0,004 x
D*M	4	67014	67014	16754	1,08	0,574 x
S*D*M	8	154667	154667	19333	1,05	0,480 x
I*M	4	32635962	32635962	8158990	62,20	0,000 x
S*I*M	8	941939	941939	117742	6,67	0,011 x
D*I*M	8	124775	124775	15597	0,96	0,533 x
S*D*I*M	16	291638	291638	18227	0,94	0,528
P	2	60515258	60515258	30257629	5,25	0,059 x
S*P	4	69083	69083	17271	0,74	0,632 x
D*P	4	81065	81065	20266	1,04	0,543 x
S*D*P	8	159269	159269	19909	1,13	0,442 x
I*P	4	3302413	3302413	825603	6,10	0,016 x
S*I*P	8	147630	147630	18454	1,10	0,460 x
D*I*P	8	144288	144288	18036	1,17	0,435 x
S*D*I*P	16	277427	277427	17339	0,89	0,580
M*P	4	20280656	20280656	5070164	37,66	0,000 x
S*M*P	8	172222	172222	21528	1,12	0,439 x
D*M*P	8	133227	133227	16653	0,94	0,541 x
S*D*M*P	16	315601	315601	19725	1,01	0,443
I*M*P	8	1064778	1064778	133097	7,86	0,008 x
S*I*M*P	16	302201	302201	18888	0,97	0,490
D*I*M*P	16	280265	280265	17517	0,90	0,570
Erreur	275	5353323	5353323	19467		
Total	485	620708437				

x n'est pas un test F exact.

S = 139,523 R carré = 99,14 % R carré (ajust) = 98,48 %

Espérance mathématique des carrés moyens, en utilisant la somme des carrés

ajustée

Source	Espérance mathématique des carrés moyens pour chaque terme
1 S	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (27) + 18,0000 (25) + 6,0000 (23) + 18,0000 (21) + 18,0000 (19) + 54,0000 (17) + 6,0000 (15) + 18,0000 (11) + 18,0000 (7) + 54,0000 (3) + Q[1; 5 ; 9 ; 13]
2 D	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (19) + 54,0000 (18) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (11) + 54,0000 (10) + 18,0000 (7) + 54,0000 (6) + 54,0000 (3) + 162,0000 (2)
3 S*D	(31) + 6,0000 (27) + 6,0000 (23) + 18,0000 (19) + 6,0000 (15) + 18,0000 (11) + 18,0000 (7) + 54,0000 (3)
4 I	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (21) + 54,0000 (20) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (7) + 54,0000 (6) + Q[4; 5 ; 12 ; 13]
5 S*I	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (23) + 18,0000 (21) + 6,0000 (15) + 18,0000 (7) + Q[5; 13]
6 D*I	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (7) + 54,0000 (6)
7 S*D*I	(31) + 6,0000 (23) + 6,0000 (15) + 18,0000 (7)
8 M	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 18,0000 (25) + 54,0000 (24) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (11) + 54,0000 (10) + Q[8; 9 ; 12 ; 13]
9 S*M	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (27) + 18,0000 (25) + 6,0000 (15) + 18,0000 (11) + Q[9; 13]
10 D*M	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (11) + 54,0000 (10)
11 S*D*M	(31) + 6,0000 (27) + 6,0000 (15) + 18,0000 (11)
12 I*M	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + Q[12; 13]
13 S*I*M	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (15) + Q[13]
14 D*I*M	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14)
15 S*D*I*M	(31) + 6,0000 (15)
16 P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 18,0000 (25) + 54,0000 (24) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (21) + 54,0000 (20) + 18,0000 (19) + 54,0000 (18) + 54,0000 (17) + 162,0000 (16)
17 S*P	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (27) + 18,0000 (25) + 6,0000 (23) + 18,0000 (21) + 18,0000 (19) + 54,0000 (17)
18 D*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (19) + 54,0000 (18)
19 S*D*P	(31) + 6,0000 (27) + 6,0000 (23) + 18,0000 (19)
20 I*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (21) + 54,0000 (20)
21 S*I*P	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (23) + 18,0000 (21)
22 D*I*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22)
23 S*D*I*P	(31) + 6,0000 (23)
24 M*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 18,0000 (25) + 54,0000 (24)
25 S*M*P	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (27) + 18,0000 (25)
26 D*M*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26)
27 S*D*M*P	(31) + 6,0000 (27)
28 I*M*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28)
29 S*I*M*P	(31) + 6,0000 (29)
30 D*I*M*P	(31) + 6,0000 (30)
31 Erreur	(31)

Termes d'erreur pour les tests, en utilisant la somme des carrés ajustée

Source	Erreur	- DL	Erreur	- CM	Synthèse du carré moyen de l'erreur
--------	--------	------	--------	------	-------------------------------------

1	S	1,17	15604	(3) + (17) - (19)
2	D	0,43	17300	(3) + (6) - (7) + (10) - (11) - (14) + (15) + (18) - (19) - (22) + (23) - (26) + (27) + (30) - (31)
3	S*D	2,86	25097	(7) + (11) - (15) + (19) - (23) - (27) + (31)
4	I	4,01	827472	(6) + (20) - (22)
5	S*I	4,33	22794	(7) + (21) - (23)
6	D*I	2,48	21696	(7) + (14) - (15) + (22) - (23) - (30) + (31)
7	S*D*I	6,33	16100	(15) + (23) - (31)
8	M	4,00	5070264	(10) + (24) - (26)
9	S*M	3,46	21136	(11) + (25) - (27)
10	D*M	1,37	15581	(11) + (14) - (15) + (26) - (27) - (30) + (31)
11	S*D*M	7,36	18486	(15) + (27) - (31)
12	I*M	7,60	131178	(14) + (28) - (30)
13	S*I*M	7,01	17648	(15) + (29) - (31)
14	D*I*M	6,41	16277	(15) + (30) - (31)
15	S*D*I*M	275,00	19467	(31)
16	P	5,03	5759629	(17) + (18) - (19) + (20) - (21) - (22) + (23) + (24) - (25) - (26) + (27) - (28) + (29) + (30) - (31)
17	S*P	2,53	23405	(19) + (21) - (23) + (25) - (27) - (29) + (31)
18	D*P	2,01	19484	(19) + (22) - (23) + (26) - (27) - (30) + (31)
19	S*D*P	6,96	17598	(23) + (27) - (31)
20	I*P	7,76	135310	(21) + (22) - (23) + (28) - (29) - (30) + (31)
21	S*I*P	6,61	16760	(23) + (29) - (31)
22	D*I*P	6,02	15389	(23) + (30) - (31)
23	S*D*I*P	275,00	19467	(31)
24	M*P	7,63	134616	(25) + (26) - (27) + (28) - (29) - (30) + (31)
25	S*M*P	7,64	19146	(27) + (29) - (31)
26	D*M*P	7,04	17775	(27) + (30) - (31)
27	S*D*M*P	275,00	19467	(31)
28	I*M*P	6,69	16938	(29) + (30) - (31)
29	S*I*M*P	275,00	19467	(31)
30	D*I*M*P	275,00	19467	(31)

Composantes de la variance, avec la somme des carrés ajustée

Source	Valeur estimée
D	-49
S*D	-127
D*I	-33
S*D*I	310
D*M	22
S*D*M	47
D*I*M	-38
S*D*I*M	-207
P	151222
S*P	-114
D*P	14
S*D*P	128
I*P	12783
S*I*P	94
D*I*P	147
S*D*I*P	-355
M*P	91399

S*M*P	132
D*M*P	-62
S*D*M*P	43
I*M*P	6453
S*I*M*P	-97
D*I*M*P	-325
Erreur	19467

Diagrammes de valeurs résiduelles pour Q

Graphique des effets principaux pour Q

Modèle linéaire général : Q en fonction de S; D; I; M; P

Facteur	Type	Niveaux	Valeurs
S	fixe	3	ARP; BRP; MBRP
D	aléatoire	3	WEIB(400,2); WEIB(400,3,5); WEIB(400,5)
I	fixe	3	0; 3; 6
M	fixe	3	2; 6; 10
P	aléatoire	3	3,5; 4,5; 5,5

Analyse de la variance pour Q, avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

Source	DL	SomCar séq	SomCar ajust	CM ajust	F	P
S	2	17112479	17112479	8556239	548,35	0,018 x
D	2	18868	18868	9434	0,55	0,763 x
S*D	4	72967	72967	18242	0,73	0,631 x
I	2	70436999	70436999	35218500	42,56	0,002 x
S*I	4	1792994	1792994	448248	19,67	0,005 x
D*I	4	79618	79618	19904	0,92	0,564 x
S*D*I	8	173438	173438	21680	1,35	0,363 x
M	2	401249901	401249901	200624950	39,57	0,002 x
S*M	4	2956474	2956474	739119	34,97	0,004 x
D*M	4	67014	67014	16754	1,08	0,574 x
S*D*M	8	154667	154667	19333	1,05	0,480 x
I*M	4	32635962	32635962	8158990	62,20	0,000 x
S*I*M	8	941939	941939	117742	6,67	0,011 x
D*I*M	8	124775	124775	15597	0,96	0,533 x
S*D*I*M	16	291638	291638	18227	0,94	0,528
P	2	60515258	60515258	30257629	5,25	0,059 x
S*P	4	69083	69083	17271	0,74	0,632 x
D*P	4	81065	81065	20266	1,04	0,543 x
S*D*P	8	159269	159269	19909	1,13	0,442 x
I*P	4	3302413	3302413	825603	6,10	0,016 x
S*I*P	8	147630	147630	18454	1,10	0,460 x
D*I*P	8	144288	144288	18036	1,17	0,435 x
S*D*I*P	16	277427	277427	17339	0,89	0,580
M*P	4	20280656	20280656	5070164	37,66	0,000 x
S*M*P	8	172222	172222	21528	1,12	0,439 x
D*M*P	8	133227	133227	16653	0,94	0,541 x
S*D*M*P	16	315601	315601	19725	1,01	0,443
I*M*P	8	1064778	1064778	133097	7,86	0,008 x
S*I*M*P	16	302201	302201	18888	0,97	0,490
D*I*M*P	16	280265	280265	17517	0,90	0,570
Erreur	275	5353323	5353323	19467		

Total 485 620708437

x n'est pas un test F exact.

S = 139,523 R carré = 99,14 % R carré (ajust) = 98,48 %

Espérance mathématique des carrés moyens, en utilisant la somme des carrés ajustée

Source	Espérance mathématique des carrés moyens pour chaque terme
1 S	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (27) + 18,0000 (25) + 6,0000 (23) + 18,0000 (21) + 18,0000 (19) + 54,0000 (17) + 6,0000 (15) + 18,0000 (11) + 18,0000 (7) + 54,0000 (3) + Q[1; 5 ; 9 ; 13]
2 D	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (19) + 54,0000 (18) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (11) + 54,0000 (10) + 18,0000 (7) + 54,0000 (6) + 54,0000 (3) + 162,0000 (2)
3 S*D	(31) + 6,0000 (27) + 6,0000 (23) + 18,0000 (19) + 6,0000 (15) + 18,0000 (11) + 18,0000 (7) + 54,0000 (3)
4 I	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (21) + 54,0000 (20) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (7) + 54,0000 (6) + Q[4; 5 ; 12 ; 13]
5 S*I	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (23) + 18,0000 (21) + 6,0000 (15) + 18,0000 (7) + Q[5; 13]
6 D*I	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (7) + 54,0000 (6)
7 S*D*I	(31) + 6,0000 (23) + 6,0000 (15) + 18,0000 (7)
8 M	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 18,0000 (25) + 54,0000 (24) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (11) + 54,0000 (10) + Q[8; 9 ; 12 ; 13]
9 S*M	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (27) + 18,0000 (25) + 6,0000 (15) + 18,0000 (11) + Q[9; 13]
10 D*M	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (11) + 54,0000 (10)
11 S*D*M	(31) + 6,0000 (27) + 6,0000 (15) + 18,0000 (11)
12 I*M	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + Q[12; 13]
13 S*I*M	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (15) + Q[13]
14 D*I*M	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14)
15 S*D*I*M	(31) + 6,0000 (15)
16 P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 18,0000 (25) + 54,0000 (24) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (21) + 54,0000 (20) + 18,0000 (19) + 54,0000 (18) + 54,0000 (17) + 162,0000 (16)
17 S*P	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (27) + 18,0000 (25) + 6,0000 (23) + 18,0000 (21) + 18,0000 (19) + 54,0000 (17)
18 D*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (19) + 54,0000 (18)
19 S*D*P	(31) + 6,0000 (27) + 6,0000 (23) + 18,0000 (19)
20 I*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (21) + 54,0000 (20)
21 S*I*P	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (23) + 18,0000 (21)
22 D*I*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22)
23 S*D*I*P	(31) + 6,0000 (23)
24 M*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 18,0000 (25) + 54,0000 (24)
25 S*M*P	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (27) + 18,0000 (25)
26 D*M*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26)
27 S*D*M*P	(31) + 6,0000 (27)
28 I*M*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28)

29 S*I*M*P (31) + 6,0000 (29)
 30 D*I*M*P (31) + 6,0000 (30)
 31 Erreur (31)

Termes d'erreur pour les tests, en utilisant la somme des carrés ajustée

	Source	Erreur - DL	Erreur - CM	Synthèse du carré moyen de l'erreur
1	S	1,17	15604	(3) + (17) - (19)
2	D	0,43	17300	(3) + (6) - (7) + (10) - (11) - (14) + (15) + (18) - (19) - (22) + (23) - (26) + (27) + (30) - (31)
3	S*D	2,86	25097	(7) + (11) - (15) + (19) - (23) - (27) + (31)
4	I	4,01	827472	(6) + (20) - (22)
5	S*I	4,33	22794	(7) + (21) - (23)
6	D*I	2,48	21696	(7) + (14) - (15) + (22) - (23) - (30) + (31)
7	S*D*I	6,33	16100	(15) + (23) - (31)
8	M	4,00	5070264	(10) + (24) - (26)
9	S*M	3,46	21136	(11) + (25) - (27)
10	D*M	1,37	15581	(11) + (14) - (15) + (26) - (27) - (30) + (31)
11	S*D*M	7,36	18486	(15) + (27) - (31)
12	I*M	7,60	131178	(14) + (28) - (30)
13	S*I*M	7,01	17648	(15) + (29) - (31)
14	D*I*M	6,41	16277	(15) + (30) - (31)
15	S*D*I*M	275,00	19467	(31)
16	P	5,03	5759629	(17) + (18) - (19) + (20) - (21) - (22) + (23) + (24) - (25) - (26) + (27) - (28) + (29) + (30) - (31)
17	S*P	2,53	23405	(19) + (21) - (23) + (25) - (27) - (29) + (31)
18	D*P	2,01	19484	(19) + (22) - (23) + (26) - (27) - (30) + (31)
19	S*D*P	6,96	17598	(23) + (27) - (31)
20	I*P	7,76	135310	(21) + (22) - (23) + (28) - (29) - (30) + (31)
21	S*I*P	6,61	16760	(23) + (29) - (31)
22	D*I*P	6,02	15389	(23) + (30) - (31)
23	S*D*I*P	275,00	19467	(31)
24	M*P	7,63	134616	(25) + (26) - (27) + (28) - (29) - (30) + (31)
25	S*M*P	7,64	19146	(27) + (29) - (31)
26	D*M*P	7,04	17775	(27) + (30) - (31)
27	S*D*M*P	275,00	19467	(31)
28	I*M*P	6,69	16938	(29) + (30) - (31)
29	S*I*M*P	275,00	19467	(31)
30	D*I*M*P	275,00	19467	(31)

Composantes de la variance, avec la somme des carrés ajustée

Source	Valeur estimée
D	-49
S*D	-127
D*I	-33
S*D*I	310
D*M	22
S*D*M	47
D*I*M	-38
S*D*I*M	-207

P	151222
S*P	-114
D*P	14
S*D*P	128
I*P	12783
S*I*P	94
D*I*P	147
S*D*I*P	-355
M*P	91399
S*M*P	132
D*M*P	-62
S*D*M*P	43
I*M*P	6453
S*I*M*P	-97
D*I*M*P	-325
Erreur	19467

Diagrammes de valeurs résiduelles pour Q

Graphique des effets principaux pour Q

2010-04-14 20:39:59

Bienvenue dans Minitab, appuyez sur F1 pour obtenir de l'aide.
Récupération du projet du fichier 'X:\PLAN FACTORIEL.MPJ'

2010-04-18 13:36:23

Bienvenue dans Minitab, appuyez sur F1 pour obtenir de l'aide.
Récupération du projet du fichier 'X:\PLAN FACTORIEL.MPJ'

Résultats pour : Feuille de travail 5

Plan factoriel à plusieurs niveaux

Facteurs :	5	Répliques :	2
Essais de base :	243	Nombre total d'essais :	486
Blocs de base :	1	Nombre total de blocs :	2

Nombre de niveaux : 3; 3; 3; 3; 3

Résultats pour : Feuille de travail 6

Plan factoriel à plusieurs niveaux

Facteurs :	5	Répliques :	2
Essais de base :	243	Nombre total d'essais :	486
Blocs de base :	1	Nombre total de blocs :	2

Nombre de niveaux : 3; 3; 3; 3; 3

ANOVA : Q en fonction de S; D; I; M; P

Facteur	Type	Niveaux	Valeurs
S	fixe	3	ARP; BRP; MBRP
D	aléatoire	3	WEIB(2,400); WEIB(3,5,400); WEIB(5,400)
I	fixe	3	0; 3; 6
M	fixe	3	2; 6; 10
P	aléatoire	3	3,5; 4,5; 5,5

Analyse de la variance pour Q

Source	DL	Somme des carrés	CM	F	P
S	2	17112479	8556239	548,35	0,018 x
D	2	18868	9434	0,55	0,763 x
S*D	4	72967	18242	0,73	0,631 x
I	2	401249901	200624950	39,57	0,002 x
S*I	4	2956474	739119	34,97	0,004 x
D*I	4	67014	16754	1,08	0,574 x
S*D*I	8	154667	19333	1,05	0,480 x
M	2	70436999	35218500	42,56	0,002 x
S*M	4	1792994	448248	19,67	0,005 x
D*M	4	79618	19904	0,92	0,564 x
S*D*M	8	173438	21680	1,35	0,363 x
I*M	4	32635962	8158990	62,20	0,000 x
S*I*M	8	941939	117742	6,67	0,011 x
D*I*M	8	124775	15597	0,96	0,533 x
S*D*I*M	16	291638	18227	0,94	0,528
P	2	60515258	30257629	5,25	0,059 x
S*P	4	69083	17271	0,74	0,632 x
D*P	4	81065	20266	1,04	0,543 x
S*D*P	8	159269	19909	1,13	0,442 x
I*P	4	20280656	5070164	37,66	0,000 x
S*I*P	8	172222	21528	1,12	0,439 x
D*I*P	8	133227	16653	0,94	0,541 x
S*D*I*P	16	315601	19725	1,01	0,443
M*P	4	3302413	825603	6,10	0,016 x
S*M*P	8	147630	18454	1,10	0,460 x
D*M*P	8	144288	18036	1,17	0,435 x
S*D*M*P	16	277427	17339	0,89	0,580
I*M*P	8	1064778	133097	7,86	0,008 x
S*I*M*P	16	302201	18888	0,97	0,490
D*I*M*P	16	280265	17517	0,90	0,570
Erreur	275	5353323	19467		
Total	485	620708437			

x n'est pas un test F exact.

S = 139,523 R carré = 99,14 % R carré (ajust) = 98,48 %

Source	Composante de variance	Terme d'erreur	Espérance mathématique des carrés moyens pour chaque terme (avec modèle non restreint)
1 S		*	(31) + 6 (29) + 6 (27) + 18 (25) + 6 (23) + 18 (21) + 18 (19) + 54 (17) + 6 (15) + 18 (11) + 18 (7) + 54 (3) + Q[1;5;9;13]
2 D	-49	*	(31) + 6 (30) + 6 (27) + 18 (26) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (19) + 54 (18) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (11) + 54 (10) + 18 (7) + 54 (6)

3	S*D	-127	* + 54 (3) + 162 (2)
4	I		* (31) + 6 (27) + 6 (23) + 18 (19) + 6 (15) + 18 (11) + 18 (7) + 54 (3)
5	S*I		* (31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (21) + 54 (20) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (7) + 54 (6) + Q[4;5;12;13]
6	D*I	22	* (31) + 6 (29) + 6 (23) + 18 (21) + 6 (15) + 18 (7) + Q[5;13]
7	S*D*I	47	* (31) + 6 (30) + 6 (23) + 18 (22) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (7) + 54 (6)
8	M		* (31) + 6 (23) + 6 (15) + 18 (7)
9	S*M		* (31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (27) + 18 (26) + 18 (25) + 54 (24) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (11) + 54 (10) + Q[8;9;12;13]
10	D*M	-33	* (31) + 6 (29) + 6 (27) + 18 (25) + 6 (15) + 18 (11) + Q[9;13]
11	S*D*M	310	* (31) + 6 (30) + 6 (27) + 18 (26) + 6 (15) + 18 (14) + 18 (11) + 54 (10)
12	I*M		* (31) + 6 (27) + 6 (15) + 18 (11)
13	S*I*M		* (31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (15) + 18 (14) + Q[12;13]
14	D*I*M	-38	* (31) + 6 (29) + 6 (15) + Q[13]
15	S*D*I*M	-207	* (31) + 6 (30) + 6 (15) + 18 (14)
16	P	151222	31 (31) + 6 (15)
17	S*P	-114	* (31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (27) + 18 (26) + 18 (25) + 54 (24) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (21) + 54 (20) + 18 (19) + 54 (18) + 54 (17) + 162 (16)
18	D*P	14	* (31) + 6 (29) + 6 (27) + 18 (25) + 6 (23) + 18 (21) + 18 (19) + 54 (17)
19	S*D*P	128	* (31) + 6 (30) + 6 (27) + 18 (26) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (19) + 54 (18)
20	I*P	91399	* (31) + 6 (27) + 6 (23) + 18 (19)
21	S*I*P	132	* (31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (23) + 18 (22) + 18 (21) + 54 (20)
22	D*I*P	-62	* (31) + 6 (29) + 6 (23) + 18 (21)
23	S*D*I*P	43	* (31) + 6 (30) + 6 (23) + 18 (22)
24	M*P	12783	31 (31) + 6 (23)
25	S*M*P	94	* (31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28) + 6 (27) + 18 (26) + 18 (25) + 54 (24)
26	D*M*P	147	* (31) + 6 (29) + 6 (27) + 18 (25)
27	S*D*M*P	-355	* (31) + 6 (30) + 6 (27) + 18 (26)
28	I*M*P	6453	31 (31) + 6 (27)
29	S*I*M*P	-97	* (31) + 6 (30) + 6 (29) + 18 (28)
30	D*I*M*P	-325	31 (31) + 6 (29)
31	Erreur	19467	31 (31) + 6 (30)

* Test synthétisé.

Termes d'erreur pour les tests synthétisés

Source	Erreur - DL	Erreur - CM	Synthèse du carré moyen de l'erreur
1 S	1,17	15604	(3) + (17) - (19)
2 D	0,43	17300	(3) + (6) - (7) + (10) - (11) - (14) + (15) + (18) - (19) - (22) + (23) - (26) + (27) + (30) - (31)
3 S*D	2,86	25097	(7) + (11) - (15) + (19) - (23) - (27) + (31)
4 I	4,00	5070264	(6) + (20) - (22)

5 S*I	3,46	21136	(7) + (21) - (23)
6 D*I	1,37	15581	(7) + (14) - (15) + (22) - (23) - (30) + (31)
7 S*D*I	7,36	18486	(15) + (23) - (31)
8 M	4,01	827472	(10) + (24) - (26)
9 S*M	4,33	22794	(11) + (25) - (27)
10 D*M	2,48	21696	(11) + (14) - (15) + (26) - (27) - (30) + (31)
11 S*D*M	6,33	16100	(15) + (27) - (31)
12 I*M	7,60	131178	(14) + (28) - (30)
13 S*I*M	7,01	17648	(15) + (29) - (31)
14 D*I*M	6,41	16277	(15) + (30) - (31)
16 P	5,03	5759629	(17) + (18) - (19) + (20) - (21) - (22) + (23) + (24) - (25) - (26) + (27) - (28) + (29) + (30) - (31)
17 S*P	2,53	23405	(19) + (21) - (23) + (25) - (27) - (29) + (31)
18 D*P	2,01	19484	(19) + (22) - (23) + (26) - (27) - (30) + (31)
19 S*D*P	6,96	17598	(23) + (27) - (31)
20 I*P	7,63	134616	(21) + (22) - (23) + (28) - (29) - (30) + (31)
21 S*I*P	7,64	19146	(23) + (29) - (31)
22 D*I*P	7,04	17775	(23) + (30) - (31)
24 M*P	7,76	135310	(25) + (26) - (27) + (28) - (29) - (30) + (31)
25 S*M*P	6,61	16760	(27) + (29) - (31)
26 D*M*P	6,02	15389	(27) + (30) - (31)
28 I*M*P	6,69	16938	(29) + (30) - (31)

Diagrammes de valeurs résiduelles pour Q

Modèle linéaire général : Q en fonction de S; D; I; M; P

Facteur	Type	Niveaux	Valeurs
S	fixe	3	ARP; BRP; MBRP
D	aléatoire	3	WEIB(2,400); WEIB(3,5,400); WEIB(5,400)
I	fixe	3	0; 3; 6
M	fixe	3	2; 6; 10
P	aléatoire	3	3,5; 4,5; 5,5

Analyse de la variance pour Q, avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

Source	DL	SomCar séq	SomCar ajust	CM ajust	F	P
S	2	17112479	17112479	8556239	548,35	0,018 x
D	2	18868	18868	9434	0,55	0,763 x
S*D	4	72967	72967	18242	0,73	0,631 x
I	2	401249901	401249901	200624950	39,57	0,002 x
S*I	4	2956474	2956474	739119	34,97	0,004 x
D*I	4	67014	67014	16754	1,08	0,574 x
S*D*I	8	154667	154667	19333	1,05	0,480 x
M	2	70436999	70436999	35218500	42,56	0,002 x
S*M	4	1792994	1792994	448248	19,67	0,005 x
D*M	4	79618	79618	19904	0,92	0,564 x
S*D*M	8	173438	173438	21680	1,35	0,363 x
I*M	4	32635962	32635962	8158990	62,20	0,000 x
S*I*M	8	941939	941939	117742	6,67	0,011 x
D*I*M	8	124775	124775	15597	0,96	0,533 x
S*D*I*M	16	291638	291638	18227	0,94	0,528
P	2	60515258	60515258	30257629	5,25	0,059 x
S*P	4	69083	69083	17271	0,74	0,632 x
D*P	4	81065	81065	20266	1,04	0,543 x

S*D*P	8	159269	159269	19909	1,13	0,442 x
I*P	4	20280656	20280656	5070164	37,66	0,000 x
S*I*P	8	172222	172222	21528	1,12	0,439 x
D*I*P	8	133227	133227	16653	0,94	0,541 x
S*D*I*P	16	315601	315601	19725	1,01	0,443
M*P	4	3302413	3302413	825603	6,10	0,016 x
S*M*P	8	147630	147630	18454	1,10	0,460 x
D*M*P	8	144288	144288	18036	1,17	0,435 x
S*D*M*P	16	277427	277427	17339	0,89	0,580
I*M*P	8	1064778	1064778	133097	7,86	0,008 x
S*I*M*P	16	302201	302201	18888	0,97	0,490
D*I*M*P	16	280265	280265	17517	0,90	0,570
Erreur	275	5353323	5353323	19467		
Total	485	620708437				

x n'est pas un test F exact.

S = 139,523 R carré = 99,14 % R carré (ajust) = 98,48 %

Espérance mathématique des carrés moyens, en utilisant la somme des carrés ajustée

Source	Espérance mathématique des carrés moyens pour chaque terme
1 S	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (27) + 18,0000 (25) + 6,0000 (23) + 18,0000 (21) + 18,0000 (19) + 54,0000 (17) + 6,0000 (15) + 18,0000 (11) + 18,0000 (7) + 54,0000 (3) + Q[1; 5 ; 9 ; 13]
2 D	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (19) + 54,0000 (18) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (11) + 54,0000 (10) + 18,0000 (7) + 54,0000 (6) + 54,0000 (3) + 162,0000 (2)
3 S*D	(31) + 6,0000 (27) + 6,0000 (23) + 18,0000 (19) + 6,0000 (15) + 18,0000 (11) + 18,0000 (7) + 54,0000 (3)
4 I	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (21) + 54,0000 (20) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (7) + 54,0000 (6) + Q[4; 5 ; 12 ; 13]
5 S*I	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (23) + 18,0000 (21) + 6,0000 (15) + 18,0000 (7) + Q[5; 13]
6 D*I	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (7) + 54,0000 (6)
7 S*D*I	(31) + 6,0000 (23) + 6,0000 (15) + 18,0000 (7)
8 M	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 18,0000 (25) + 54,0000 (24) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (11) + 54,0000 (10) + Q[8; 9 ; 12 ; 13]
9 S*M	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (27) + 18,0000 (25) + 6,0000 (15) + 18,0000 (11) + Q[9; 13]
10 D*M	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + 18,0000 (11) + 54,0000 (10)
11 S*D*M	(31) + 6,0000 (27) + 6,0000 (15) + 18,0000 (11)
12 I*M	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14) + Q[12; 13]
13 S*I*M	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (15) + Q[13]
14 D*I*M	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (15) + 18,0000 (14)
15 S*D*I*M	(31) + 6,0000 (15)
16 P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 18,0000 (25) + 54,0000 (24) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (21) + 54,0000 (20) + 18,0000 (19) + 54,0000 (18) + 54,0000 (17) + 162,0000 (16)
17 S*P	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (27) + 18,0000 (25) + 6,0000 (23) + 18,0000 (21) + 18,0000 (19) + 54,0000 (17)
18 D*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 6,0000 (23) +

		18,0000 (22) + 18,0000 (19) + 54,0000 (18)
19	S*D*P	(31) + 6,0000 (27) + 6,0000 (23) + 18,0000 (19)
20	I*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22) + 18,0000 (21) + 54,0000 (20)
21	S*I*P	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (23) + 18,0000 (21)
22	D*I*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (23) + 18,0000 (22)
23	S*D*I*P	(31) + 6,0000 (23)
24	M*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26) + 18,0000 (25) + 54,0000 (24)
25	S*M*P	(31) + 6,0000 (29) + 6,0000 (27) + 18,0000 (25)
26	D*M*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (27) + 18,0000 (26)
27	S*D*M*P	(31) + 6,0000 (27)
28	I*M*P	(31) + 6,0000 (30) + 6,0000 (29) + 18,0000 (28)
29	S*I*M*P	(31) + 6,0000 (29)
30	D*I*M*P	(31) + 6,0000 (30)
31	Erreur	(31)

Termes d'erreur pour les tests, en utilisant la somme des carrés ajustée

	Source	Erreur - DL	Erreur - CM	Synthèse du carré moyen de l'erreur
1	S	1,17	15604	(3) + (17) - (19)
2	D	0,43	17300	(3) + (6) - (7) + (10) - (11) - (14) + (15) + (18) - (19) - (22) + (23) - (26) + (27) + (30) - (31)
3	S*D	2,86	25097	(7) + (11) - (15) + (19) - (23) - (27) + (31)
4	I	4,00	5070264	(6) + (20) - (22)
5	S*I	3,46	21136	(7) + (21) - (23)
6	D*I	1,37	15581	(7) + (14) - (15) + (22) - (23) - (30) + (31)
7	S*D*I	7,36	18486	(15) + (23) - (31)
8	M	4,01	827472	(10) + (24) - (26)
9	S*M	4,33	22794	(11) + (25) - (27)
10	D*M	2,48	21696	(11) + (14) - (15) + (26) - (27) - (30) + (31)
11	S*D*M	6,33	16100	(15) + (27) - (31)
12	I*M	7,60	131178	(14) + (28) - (30)
13	S*I*M	7,01	17648	(15) + (29) - (31)
14	D*I*M	6,41	16277	(15) + (30) - (31)
15	S*D*I*M	275,00	19467	(31)
16	P	5,03	5759629	(17) + (18) - (19) + (20) - (21) - (22) + (23) + (24) - (25) - (26) + (27) - (28) + (29) + (30) - (31)
17	S*P	2,53	23405	(19) + (21) - (23) + (25) - (27) - (29) + (31)
18	D*P	2,01	19484	(19) + (22) - (23) + (26) - (27) - (30) + (31)
19	S*D*P	6,96	17598	(23) + (27) - (31)
20	I*P	7,63	134616	(21) + (22) - (23) + (28) - (29) - (30) + (31)
21	S*I*P	7,64	19146	(23) + (29) - (31)
22	D*I*P	7,04	17775	(23) + (30) - (31)
23	S*D*I*P	275,00	19467	(31)
24	M*P	7,76	135310	(25) + (26) - (27) + (28) - (29) - (30) + (31)
25	S*M*P	6,61	16760	(27) + (29) - (31)
26	D*M*P	6,02	15389	(27) + (30) - (31)
27	S*D*M*P	275,00	19467	(31)
28	I*M*P	6,69	16938	(29) + (30) - (31)
29	S*I*M*P	275,00	19467	(31)
30	D*I*M*P	275,00	19467	(31)

Composantes de la variance, avec la somme des carrés ajustée

Source	Valeur estimée
D	-49
S*D	-127
D*I	22
S*D*I	47
D*M	-33
S*D*M	310
D*I*M	-38
S*D*I*M	-207
P	151222
S*P	-114
D*P	14
S*D*P	128
I*P	91399
S*I*P	132
D*I*P	-62
S*D*I*P	43
M*P	12783
S*M*P	94
D*M*P	147
S*D*M*P	-355
I*M*P	6453
S*I*M*P	-97
D*I*M*P	-325
Erreur	19467

2010-05-14 10:10:01

Bienvenue dans Minitab, appuyez sur F1 pour obtenir de l'aide.
Récupération du projet du fichier 'X:\PLAN FACTORIEL FINAL.MPJ'

ANOVA II

2010-05-26 10:54:27

Bienvenue dans Minitab, appuyez sur F1 pour obtenir de l'aide.

Modèle linéaire général : Q en fonction de S; D; I; M; P

Facteur	Type	Niveaux	Valeurs
S	fixe	3	ARP; BRP; MBRP
D	fixe	3	WEIB(2,400); WEIB(3,5,400); WEIB(5,400)
I	fixe	3	0; 3; 6
M	fixe	3	2; 6; 10
P	fixe	3	3,5; 4,5; 5,5

Analyse de la variance pour Q, avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

Source	DL	SomCar séq	SomCar ajust	CM ajust	F	P
S	2	17112479	17112479	8556239	445,35	0,000
D	2	18868	18868	9434	0,49	0,612

S*D	4	72967	72967	18242	0,95	0,435
I	2	401249901	401249901	200624950	10442,39	0,000
S*I	4	2956474	2956474	739119	38,47	0,000
D*I	4	67014	67014	16754	0,87	0,481
S*D*I	8	154667	154667	19333	1,01	0,431
M	2	70436999	70436999	35218500	1833,10	0,000
S*M	4	1792994	1792994	448248	23,33	0,000
D*M	4	79618	79618	19904	1,04	0,388
S*D*M	8	173438	173438	21680	1,13	0,343
I*M	4	32635962	32635962	8158990	424,67	0,000
S*I*M	8	941939	941939	117742	6,13	0,000
D*I*M	8	124775	124775	15597	0,81	0,593
P	2	60515258	60515258	30257629	1574,89	0,000
S*P	4	69083	69083	17271	0,90	0,465
D*P	4	81065	81065	20266	1,05	0,379
S*D*P	8	159269	159269	19909	1,04	0,408
I*P	4	20280656	20280656	5070164	263,90	0,000
S*I*P	8	172222	172222	21528	1,12	0,348
D*I*P	8	133227	133227	16653	0,87	0,545
M*P	4	3302413	3302413	825603	42,97	0,000
S*M*P	8	147630	147630	18454	0,96	0,467
D*M*P	8	144288	144288	18036	0,94	0,484
I*M*P	8	1064778	1064778	133097	6,93	0,000
Erreur	355	6820455	6820455	19213		
Total	485	620708437				

S = 138,609 R carré = 98,90 % R carré (ajust) = 98,50 %

ANNEXE III

Optimisation et Validation des réseaux

1. Optimisation de la stratégie ARP :

X:\opstr\REMP AGE_EXCEL2 (2).doe
 2010-05-04 11:53:45
 New Objective: 37524.125 Feasible
 Age remp[1]: **435.982848249213**
 Age remp[2]: 435.982848249213
 New Objective: 37502.3333333333 Feasible
 Age remp[1]: 435.914241246063
 Age remp[2]: 435.914241246063
 New Objective: 37500.6666666667 Feasible
 Age remp[1]: 435.9
 Age remp[2]: 435.9

2. Optimisation de la stratégie BRP :

X:\opstr\BRP2.doe
 2010-05-04 12:47:14
 New Objective: 37776.3333333333 Feasible
 PERIODE DE REMP[1]: 936.651741125791
 PERIODE DE REMP[2]: 936.651741125791
 New Objective: 37774.6666666667 Feasible
 PERIODE DE REMP[1]: 968.325870562896
 PERIODE DE REMP[2]: 968.325870562896
 New Objective: 37773 Feasible
 PERIODE DE REMP[1]: 937.151741125791
 PERIODE DE REMP[2]: 937.151741125791

3. Optimisation de la stratégie MBRP

X:\opstr\MBRP2.doe
 2010-05-04 13:33:21

New Objective: 37780.3333333333 Feasible

PERIODE DE REMP[1]: 983

PERIODE DE REMP[2]: 983

seuil[1]: 989

seuil[2]: 989

New Objective: 37780.3333333333 Feasible

PERIODE DE REMP[1]: 983

PERIODE DE REMP[2]: 983

seuil [1]: 984

seuil [2]: 984

New Objective: 37780.3333333333 Feasible

PERIODE DE REMP[1]: 983

PERIODE DE REMP[2]: 983

seuil[1]: 1000

seuil[2]: 1000

La partie validation :

Validation du Réseau II:

Afin de valider la conception et le fonctionnement du réseau de maintenance pour les trois types de stratégies, une étude comparative entre les résultats de simulations et celles obtenus analytiquement par d'autres recherches pertinentes est réalisée.

- **Formulation du modèle analytique pour la stratégie de type âge**

Le système considéré pour étudier et simuler la stratégie de maintenance de type âge est sélectionné dans un des travaux de recherche effectué par **Barlow et Proschan (1965)**.

Le cas considéré comporte : une pièce (tube) faisant partie d'un circuit électronique de communication d'un avion. Les bris de ce tube sont distribués selon une loi normale tronquée, et la pièce a une durée de vie moyenne $\mu = 9080$ heures et un écart – type $\sigma = 3027$ heures.

Les données de cet exemple sont :

- Le coût de remplacement à la panne par pièce (tube) neuve est $C_1 = 1100$ \$,
- Le coût de remplacement préventive par du neuf est $C_2 = 100$ \$,

La fonction objective est illustrée dans l'équation mathématique suivante :

$$C(x) = \frac{c_c F(x) + c_p R(x)}{\int_0^x R(u) du}, \text{ pour } x \geq 0 \quad (1)$$

Résultats analytiques et de simulation pour la stratégie de type âge

*** Résultats analytiques :**

Pour un temps de remplacement entre 1000-10000 heures. Les valeurs analytiques ont été déjà mentionnées dans le rapport du (Fagnart, C.2001), et sont calculées à partir de l'équation (1). Le tableau montre les résultats analytiques retrouvés.

Tableau 1 : Résultats analytiques du coût total moyen par unité du temps(ARP)

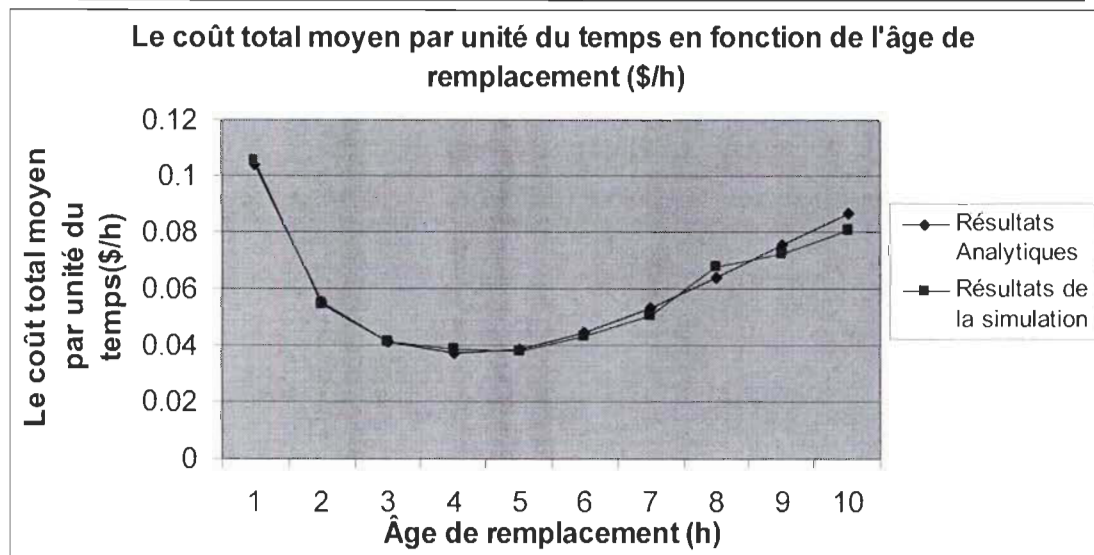
Temps de remplacement x (h)	Coût total moyen par unité du temps (\$/h)
1000	0.1040
2000	0.0550
3000	0.0411
4000	0.0372
5000	0.0387
6000	0.0442
7000	0.0528
8000	0.0635
9000	0.0753
10000	0.0870

*** Résultats de la simulation :**

Le tableau suivant illustre les valeurs trouvées par la simulation, pour une durée égale à 10^6 heures et un âge de remplacement compris entre 1000 – 10000 heures.

Tableau 2 : Résultats de la simulation

Âge de remplacement x (h)	Coût total moyen par unité du temps (\$/h)
1000	0.10554
2000	0.05444
3000	0.04086
4000	0.03822
5000	0.03758
6000	0.0428
7000	0.0501
8000	0.06764
9000	0.07236
10000	0.08106

**Figure : Comportement du coût en fonction de l'âge de remplacement**

À la lumière de la figure, les valeurs calculées par la méthode analytique et celles de la simulation sont presque équivalents. Ce qui valide le réseau de simulation pour la stratégie de remplacement de type âge.

- **Formulation du modèle analytique pour la stratégie de type Bloc (BRP)**

D'après Tango Toshiro (1978), la fonction objective du coût moyen par unité de temps s'écrit sous la forme suivante :

$$B(T) = \frac{C_1 \cdot M(T) + C_2}{T} \quad (2)$$

Pour faciliter cette étude comparative, la fonction $B(T)$ est reformulée : en utilisant la loi de distribution Erlang (1, 2), puisque sa fonction de renouvellement $M(T)$ est facile à calculer. Les propriétés et la fonction de renouvellement de la loi Erlang(1,2) se présentent comme suit :

$$f(t) = t \cdot \exp(-t), t \geq 0 \quad (3)$$

$$\bar{F}(t) = \exp(-t)(1+t), t \geq 0$$

$$M(t) = \frac{1}{4}(2t - 1 + \exp(-2t))$$

$$m(t) = \frac{1}{2}(1 - \exp(-2t))$$

(4)

Ce qui nous donne :

$$B(T) = \frac{\frac{1}{4}(2T - 1 + \exp(-2T)) \cdot C_1 + C_2}{T}, T \geq 0 \quad (5)$$

Résultats analytique et de simulation :

Le tableau suivant indique les valeurs du coût total moyen par unité du temps, pour un temps de remplacement préventive compris entre 10-100 heures.

Soit;

$$C_1 = 43\$,$$

$$C_2 = 10\$,$$

$\exp(-2T) \approx 0$, pour des valeurs élevées de T .

La durée de simulation est égale à 10^6 heures.

Tableau : Résultats analytiques et de la simulation

Temps de remplacement x (h)	Coût total moyen par unité du temps (\$/h)	
	Simulation	Analytique
1000	21.457924	21.425
2000	21.435224	21.462
3000	21.467714	21.475
4000	21.487944	21.481
5000	21.513280	21.485
6000	21.454094	21.487
7000	21.501932	21.489
8000	21.423488	21.490
9000	21.486314	21.491
10000	21.497302	21.492

Afin de s'assurer du bon fonctionnement du réseau de la simulation pour la stratégie **BRP**, on a repris le même exemple du tube électronique dont les bris suivent une loi normale (9080;3027). Les résultats analytiques et numériques sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau : Résultats Analytiques et de la simulation pour la stratégie BRP.

Temps de remplacement x (h)	Coût total moyen par unité du temps (\$/h)	
	Simulation	Analytique
1000	0.10518	0.105
2000	0.0554	0.055
3000	0.0410	0.040
4000	0.03854	0.0375
5000	0.03838	0.0375
6000	0.04234	0.0425
7000	0.0516	0.0525
8000	0.0652	0.0625
9000	0.07314	0.0725
10000	0.08052	0.080

Selon la courbe ci-dessous, le fonctionnement du réseau de la stratégie **BRP** est bien valide.

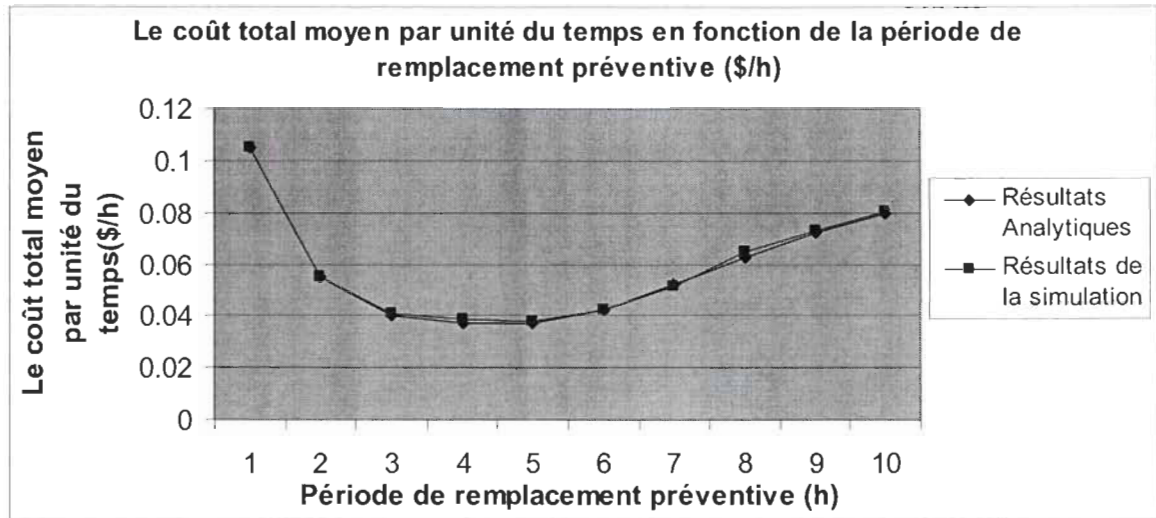


Figure : Comportement du coût en fonction de la période du remplacement préventive

- **Formulation du modèle analytique pour la stratégie MBRP**

D'après Berg et Epstein (1976), le modèle mathématique de cette stratégie est présenté par l'équation suivante :

$$C(b, T) = \frac{c_1}{4T} \left(2T - \frac{(1 - e^{-2T})e^{-b}(1+b)}{1 - e^{-2T}(1 - e^b(1-b))} \right) + \frac{c_2}{T} e^{-b} \left(1 + \frac{b}{2} + \frac{b(1+b)e^{-2T+b}}{2 - 2e^{-2T}(1 - e^b(1-b))} \right), \quad T \geq 0 \quad (6)$$

Sachant que :

b : Le seuil d'âge minimum à atteindre pour faire un remplacement préventif,

T : La période de remplacement préventive,

La loi de distribution est la loi d'Erlang (1,2).

Résultats analytiques et de la simulation

Les résultats sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Soient les données suivantes : $c_1 = 43\$$
 $c_2 = 10\$$

Tableau : Résultats analytiques et numérique pour la stratégie MBRP

b : Seuil (heures)	T : Temps de remplacement préventif (heures)	Coût total moyen par unité du temps (\$/h)	
		Analytique	Simulation
b = 10	10	21.50	21.51
	20	21.49	21.49
	30	21.50	21.50
b = 5	10	21.47	21.49
	20	21.50	21.48
	30	21.50	21.49
b = 15	20	21.50	21.51
	40	21.50	21.49
	60	21.50	21.50

À la lumière de ce dernier tableau, le réseau de la stratégie **MBRP** roule très bien.

Validation du réseau I de la production :

Pour cette partie, on désire vérifier que le modèle de production permet d'avoir toute l'information désirée en ce qui concerne le temps de passage des entités dans le réseau, la quantité produite et le taux d'utilisation des ressources (les machines travaillant en série) en cas d'absence des pannes aléatoires. Le cas qui est traité est celui de deux machines travaillant en séries avec stock tampons de capacité 3.

Afin de vérifier certaines mesures de performances, le réseau est simulé sur 1000 heures avec une seule réplique et le temps de production sur chaque machine est d'une unité de temps.

Le tableau qui vient juste après mentionne tous les résultats concernant les mesures de performances pris en considération.

Tableau : Comparaison entre les résultats théorique et de simulation de certaines mesures de performance.

	Théorie		Rapport de la simulation	
• Temps de passage	2 heures		VA TIME = 2 heures	
• Capacité du stock	3 unités		3 unités (en considérant un temps aléatoire de production)	
• Quantité produite	998 unités		999 unités	
• Taux d'utilisation des Ressources	M1	M2	M1	M2
	100%	99.8%	100%	99%

Remarque : La capacité du stock intermédiaire et les files d'attentes sont vérifiées visuellement, grâce à l'animation.

La lecture et l'analyse de ces mesures de performances, a permis de confirmer le bon fonctionnement du réseau de production.

Validation du modèle en entier :

Pour cette partie de validation, le même cas précédent est repris, c'est-à-dire les deux machines en séries avec un stock tampon, mais cette fois est en présence des pannes aléatoires qui viennent interrompre la production.

Supposons que les défaillances suivent la loi de WEIBULL(2,400).

Tableau : Comparaison entre les résultats théorique et de simulation de certaines mesures de performance pour tout le modèle.

	Théorie		Rapport de la simulation	
• Temps de passage	≥ 2 heures		2.513 heures	
• Capacité du stock	3 unités		3 unités (en considérant un temps aléatoire de production)	
• Quantité produite	<< 998 unités		976 unités	
• Taux d'utilisation des Ressources	M1	M2	M1	M2
	100%	<< 99.8%	100%	97%

La lecture de ces derniers résultats prouve le bon fonctionnement du modèle de simulation.